

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Лабораторный практикум К-303.1
по дисциплине «Физика»
для обучающихся всех специальностей
и направлений бакалавриата всех форм обучения

Составители Т. В. Лавряшина
 А. А. Фофанов
 И. В. Цвеклинская

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 5 от 30.12.2019

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления подготовки 20.03.01
Протокол № 6 от 06.02.2020

Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации студентам	2
Лабораторная работа № 1 «Расчёт погрешностей результатов измерений».....	3
Лабораторная работа № 2 «Изучение законов движения системы связанных тел».....	10
Лабораторная работа № 3 «Изучение поступательного и вращательного движения с помощью маятника Обербека».....	17
Лабораторная работа № 4 «Проверка уравнения динамики вращательного движения».....	23
Лабораторная работа № 5 «Изучение ударного взаимодействия твёрдых тел».....	30
Вопросы для самоподготовки.....	35
Список рекомендуемой литературы.....	37

Методические рекомендации студентам

В лабораторный практикум К-303.1 включены лабораторные работы по разделу «Физические основы механики», предусмотренные рабочей программой дисциплины «Физика» для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

При выполнении лабораторного практикума студент не только получает элементарные навыки проведения эксперимента, но и учится самостоятельно анализировать физические явления, сопоставлять выводы теории и экспериментальные результаты, выделять главное, понимать роль идеализации, рассчитывать погрешности измерений.

Рекомендации студентам по организации самостоятельной работы в учебных лабораториях включают следующие положения.

1. На каждое занятие согласно графику выполнения лабораторных работ студент приходит подготовленным. На самостоятельную работу студентам по учебному плану отводится 50 % от объёма часов, предусмотренных для изучения дисциплины, в том числе на подготовку к выполнению каждой лабораторной работы около 4 часов.

2. Подготовка включает изучение содержания лабораторной работы, проработку теоретического материала по учебникам и учебным пособиям для самостоятельной работы, заготовку краткого конспекта отчёта предстоящей работы. Конспект отчёта содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчёта может быть выполнен как в рукописном, так и в электронном варианте.

3. Для выполнения работы необходимо получить допуск, объяснив суть используемого метода, устройство установки, порядок измерений, алгоритм вычислений искомых величин и их погрешностей, а также ожидаемый характер исследуемых зависимостей.

4. Результаты эксперимента и отчёт, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Расчёт погрешностей результатов измерений

1. Цель работы: освоить методику расчёта погрешностей прямых и косвенных измерений.

2. Приборы и принадлежности: микрометр, штангенциркуль, измеряемое тело.

3. Подготовка к работе: изучить по [2] Приложения, П. 3; данное методическое указание; ответить на вопросы для самоподготовки 1–4.

Для выполнения данной лабораторной работы студент должен: а) знать об измерениях и их погрешностях; б) уметь рассчитывать погрешности прямых и косвенных измерений; в) уметь пользоваться микрометром и штангенциркулем.

4. Выполнение работы

4.1. Виды погрешностей физических величин

Физический эксперимент сопровождается измерениями, при которых неизбежно возникают погрешности, вызывающие отклонение полученного результата от истинного значения измеряемой величины. *Измерением* называется сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения – *эталоном*.

Различают измерения *прямые* (искомая величина определяется с помощью измерительного прибора) и *косвенные* (физическая величина вычисляется с помощью определённой формулы, в которую входят другие величины, предварительно определённые путём прямых измерений).

Погрешности подразделяют на три группы:

а) *случайные погрешности*, вызываемые многими причинами и непредсказуемо изменяющие своё значение и знак;

б) *систематические погрешности*, сохраняющие величину и знак от опыта к опыту. К ним относятся приборные или инструментальные погрешности;

в) *инструментальные (приборные) погрешности* – это такие погрешности, которые принадлежат данному средству измерений и определяются ценой деления или половиной цены деления шкалы измерительного прибора.

4.2. Приборы для определения линейных размеров тел

4.2.1. *Штангенциркуль* – высокоточный инструмент, используемый для измерения наружных и внутренних линейных размеров, глубин отверстий и пазов, разметки.

Устройство механического двухстороннего штангенциркуля с глубиномером представлено на рис. 1. Пределы измерений этого инструмента составляют 0–150 мм. С его помощью можно измерять как наружные, так и внутренние размеры, глубину отверстий с точностью до 0,05 мм.

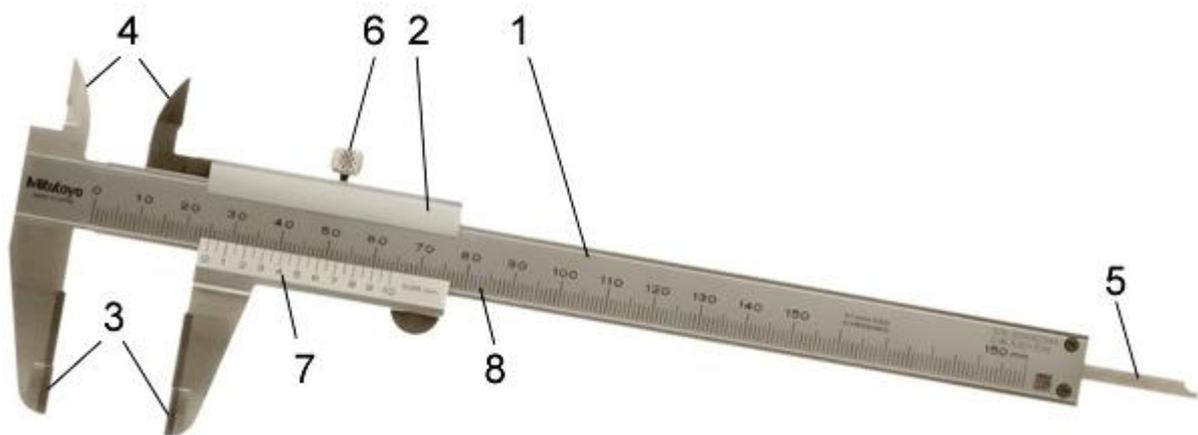


Рис. 1. Штангенциркуль:

1 – штанга; 2 – рамка; 3 – губки для наружных измерений;
4 – губки для внутренних измерений; 5 – линейка глубиномера;
6 – стопорный винт для фиксации рамки; 7 – шкала нониуса
(служит для отсчёта долей миллиметров); 8 – шкала штанги

4.2.1.1. Определение показаний по нониусу

Для определения показаний штангенциркуля необходимо сложить значения его основной и вспомогательной шкалы.

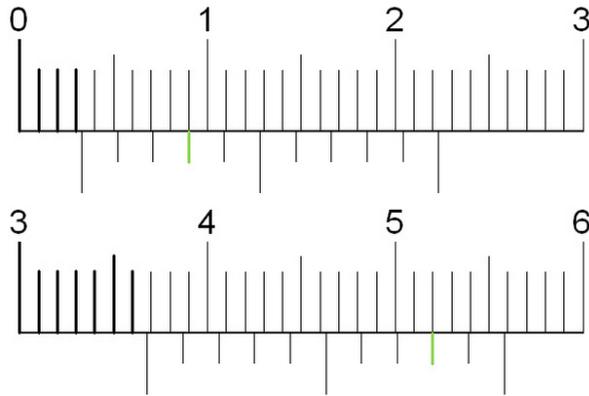


Рис. 2. Показания штангенциркуля ШЦ-1

- Количество целых миллиметров отсчитывается по шкале штанги слева направо. *Указателем служит нулевой штрих нониуса.*

- Для отсчёта долей миллиметра необходимо найти тот штрих нониуса, *который наиболее точно совпадает с одним из штрихов основной шкалы.* После этого нужно умножить порядковый номер найденного штриха нониуса (не считая нулевого) на цену деления его шкалы.

На рис. 2 представлены показания штангенциркуля ШЦ-1 (цена деления шкалы нониуса у штангенциркуля ШЦ-1 составляет 0,1 мм). В первом случае эти показания $3 + 3 \cdot 0,1 = 3,3$ (мм), а во втором – $36 + 8 \cdot 0,1 = 36,8$ (мм).

Губки для внутренних измерений 4 (см. рис. 1) имеют ножевидную форму. Благодаря этому размер отверстия определяется по шкале без дополнительных вычислений. Если губки штангенциркуля ступенчатые, то при измерении пазов и отверстий к полученным показаниям необходимо прибавлять их суммарную толщину.

Величина отсчёта по нониусу у различных моделей инструмента может отличаться: 0,02 мм, 0,05 мм, 0,1 мм. Точность приборов с величиной отсчёта по нониусу 0,02 мм приближается к точности микрометров. Точность измерений зависит от различных факторов: величины отсчёта по нониусу, навыков работы, исправного состояния инструмента.

4.2.2. Микрометр

Микрометром (рис. 3) производят измерения линейных размеров небольших тел с точностью до сотых долей миллиметра.

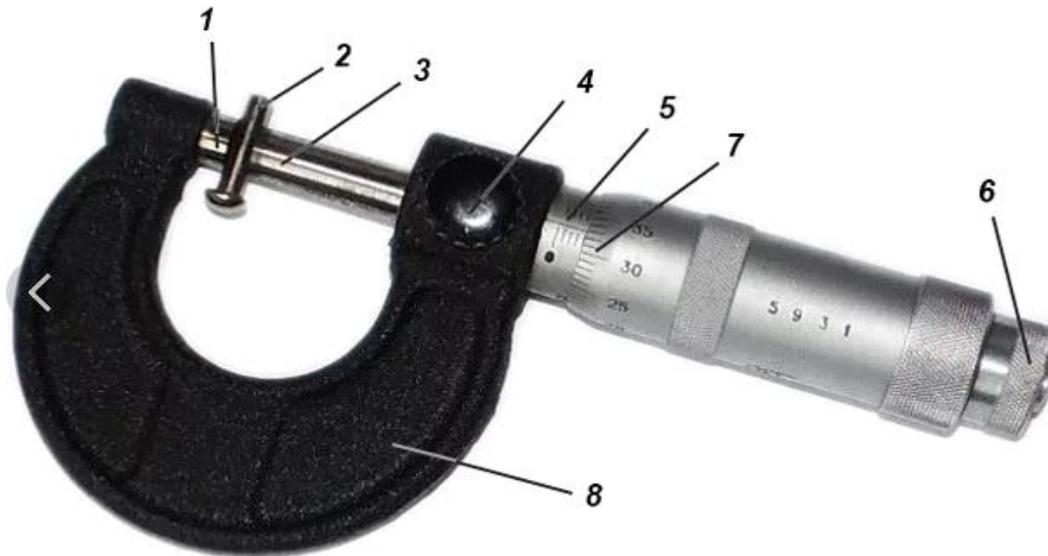


Рис. 3. Микрометр:

- 1 – пятка; 2 – измеряемый предмет;
 3 – шпindelь микрометрического винта; 4 – стопор микрометрического винта; 5 – полый стержень с горизонтальной шкалой; 6 – трещотка;
 7 – барабан с круговой шкалой; 8 – скоба

Микрометр состоит из полого стержня 5, жёстко соединённого со скобой 8. В полость стержня ввинчен микрометрический винт 3. При повороте микровинта вместе с ним вращается барабан 7, перемещаясь при этом поступательно относительно стержня 5. Наиболее распространён микрометр, у которого цена деления линейной шкалы стержня $b = 0,5$ мм. Для удобства верхние и нижние риски шкалы стержня 5 сдвинуты относительно друг друга на 0,5 мм, цифры проставлены только у нижней шкалы. Шаг микровинта $h = 0,5$ мм, цена деления микрометра – 0,01 мм/дел (она указывается).

Методика измерения линейных размеров микрометром приведена на рис. 4.

Показания микрометра согласно рис. 4, а:

$$9 + 36 \times 0,01 = 9,36 \text{ (мм)}.$$

Отличие показаний, приведённых на рис. 4, б, в том, что к целому числу делений нижней части линейной шкалы добавляется значение 0,5 мм:

$$9 + 0,5 + 36 \times 0,01 = 9,86 \text{ (мм)}.$$

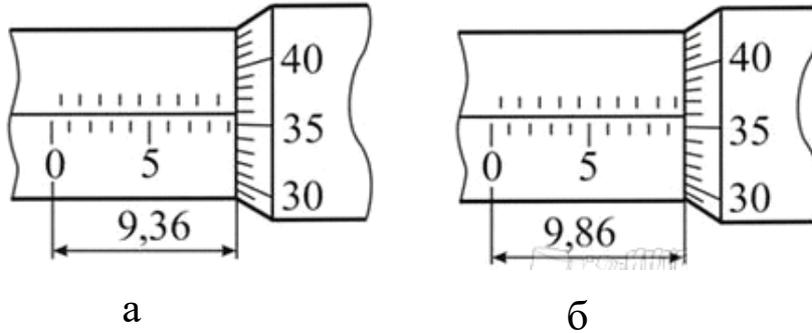


Рис. 4. Методика измерения линейных размеров микрометром

4.3. Расчёт погрешностей прямых измерений

4.3.1. Измерьте не менее 5 раз искомую величину x и получите ряд близких значений x_i :

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n .$$

Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

Вычисление погрешностей прямых измерений линейных размеров исследуемого тела

$$\alpha = \quad ; t_{\alpha, n} =$$

№ опыта	x_i	$\langle x \rangle$	Δx_i	Δx_i^2	$\sigma_{\langle x \rangle}$	$\Delta x_{\text{сл}}$	$\Delta x_{\text{пр}}$	Δx	$\varepsilon_x, \%$
Формула		(1)	(2)		(3)	(4)		(5)	(6)
1									
2									
3									
...									
n									

α – коэффициент надёжности, который нужно выбрать самостоятельно ($\alpha = 0,9; 0,95; 0,99; 0,999$ и т. д.); $t_{\alpha, n}$ – коэффи-

циент Стьюдента для выбранных значений α и числа измерений n (приводится в специальной таблице).

4.3.2. Вычислите *среднее значение* $\langle x \rangle$ измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

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

4.3.3. Рассчитайте *абсолютную погрешность каждого измерения* Δx_i (по модулю):

$$\Delta x_1 = |\langle x \rangle - x_1|, \Delta x_2 = |\langle x \rangle - x_2|, \dots, \Delta x_n = |\langle x \rangle - x_n|. \quad (2)$$

4.3.4. Рассчитайте *среднюю квадратичную погрешность отклонения от среднего арифметического* $\sigma_{\langle x \rangle}$:

$$\sigma_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Вероятность попадания значений x в указанный интервал называется *надёжностью* α эксперимента, которая прямо пропорциональна числу измерений n . При ограниченном числе измерений для достижения достаточно высокой надёжности среднюю квадратичную погрешность умножают на поправочный коэффициент $t_{\alpha, n}$, значения которого были рассчитаны Стьюдентом.

Следовательно, абсолютная случайная погрешность $\Delta x_{сл}$:

$$\Delta x_{сл} = \sigma_{\langle x \rangle} t_{\alpha, n}. \quad (4)$$

4.3.5. За *приборную погрешность* $\Delta x_{пр}$ примите цену деления или половину цены деления шкалы используемого измерительного прибора.

4.3.6. *Абсолютную погрешность* Δx рассчитайте по формуле

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{пр}^2}. \quad (5)$$

4.3.7 *Относительная погрешность* ε_x даёт более наглядное представление о качестве измерений. Она определяет, сколько процентов от среднего значения $\langle x \rangle$ составляет абсолютная погрешность:

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

4.3.8. Ответ для измеряемой величины запишите в виде доверительного интервала:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \text{ (размерность).}$$

Если необходимо, измерения и вычисления погрешностей прямых измерений повторите для других величин. Результаты занесите в таблицы, аналогичные табл. 1.

4.4. Расчёт погрешностей косвенных измерений

Для расчёта абсолютной Δy и относительной ε_y погрешностей косвенного измерения величины y , являющейся функцией нескольких величин a, b, c , необходимо определить абсолютные ($\Delta a, \Delta b, \Delta c$) и относительные ($\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$) погрешности каждой величины по схеме, описанной в п. 4.3.

Для искомой величины y , определяемой по формуле

$$y = a^\alpha b^\beta c^\gamma ,$$

(α, β и γ – любые числа) относительная погрешность ε_y находится из соотношения

$$\varepsilon_y = \sqrt{\alpha^2 \varepsilon_a^2 + \beta^2 \varepsilon_b^2 + \gamma^2 \varepsilon_c^2} , \quad (7)$$

где относительные погрешности $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ измерены в процентах.

Тогда абсолютная погрешность Δy косвенных измерений определится по формуле

$$\Delta y = \frac{\varepsilon_y \langle y \rangle}{100\%} ,$$

где $\langle y \rangle = \langle a \rangle^\alpha \langle b \rangle^\beta \langle c \rangle^\gamma$.

Например, измеряется косвенно объём V цилиндра, диаметр которого d , высота h :

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h.$$

Относительная ε_V и абсолютная ΔV погрешности косвенных измерений объёма цилиндра, если пренебречь погрешностью в определении постоянной π , равны

$$\varepsilon_V = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_h^2}, \quad \Delta V = \frac{\varepsilon_V \langle V \rangle}{100\%}, \quad (8)$$

где $\langle V \rangle$ – среднее значение объёма цилиндра, определяемое соотношением:

$$\langle V \rangle = \frac{\pi \langle d \rangle^2}{4} \langle h \rangle. \quad (9)$$

Результат запишется в виде $V = \langle V \rangle \pm \Delta V$ (размерность).

5. Сделайте выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Изучение законов движения системы связанных тел

1. Цель работы: экспериментальное определение кинематических и динамических характеристик системы связанных тел.

2. Оборудование: экспериментальная установка (стойка с вращающимся столиком), стержень, груз с нитью, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–15; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) основные кинематические и динамические параметры поступательного и вращательного движения (скорость, ускорение, угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение, массу, силу, момент силы, момент инерции); б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения энергии.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стойки с укреплённым на ней с помощью подшипника шкивом, радиус которого r , и столика, жёстко связанного со шкивом. Шкив и столик имеют общую ось вращения Z . На шкив наматывается нить, перекинутая через блок, ко второму концу которой подвешивается груз массой m . Опускаясь с высоты h , груз приводит во вращательное движение шкив со столиком. Считая нить нерастяжимой, пренебрегая её массой и массой блока, можно рассматривать данную систему как систему двух связанных тел. При этом масса m груза должна быть достаточной для обеспечения равноускоренного движения указанных тел.

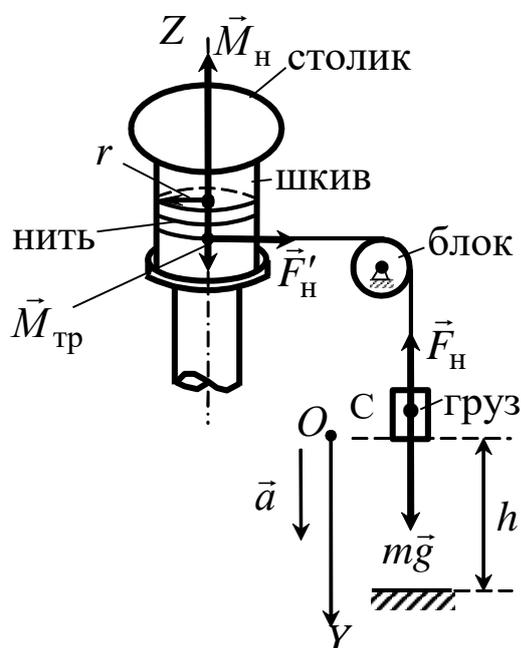


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

4.2. Методика измерений и расчёта кинематических характеристик

4.2.1. Намотайте на шкив нить, перекиньте её через блок и к свободному концу нити прикрепите груз. С помощью мас-

штабной линейки задайте высоту h груза относительно выбранного уровня (во всех опытах эта величина должна быть одинаковой). Отпуская груз заданной массы m , одновременно включите секундомер, выключите его, когда груз достигнет этого уровня. Определите время t падения груза не менее 5 раз. Измерьте штангенциркулем диаметр D шкива, рассчитайте его радиус r . Данные измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

*Кинематические характеристики движения груза
и шкива со столиком*

 $h =$ $r =$ $m =$

№ п/п	t , с	$\langle t \rangle$, с	v , м/с	a , м/с ²	ω , с ⁻¹	ε , с ⁻²	φ , рад	N , об
Формула			(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1								
2								
3								
4								
5								

4.2.2. Для определения скорости груза v и ускорения a в конце его поступательного движения направим ось OY вдоль движения груза (см. рис. 1). Так как начальная скорость груза равна нулю, то проекция v_y скорости его движения на выбранную ось имеет вид

$$v_y = a_y t, \quad (1)$$

где a_y – проекция вектора \vec{a} ускорения груза; t – время его движения. Координата y груза со временем изменяется по уравнению

$$y = \frac{a_y t^2}{2}. \quad (2)$$

Пройденный грузом путь вдоль оси OY за время t равен $\Delta y = h$. Решая систему уравнений (1) и (2), находим расчётные формулы для конечной скорости груза $v = v_y$

$$v = \frac{2h}{t} \quad (3)$$

и его ускорения $a = a_y$:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (4)$$

Все кинематические характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени $\langle t \rangle$.

4.2.3. Равноускоренное вращательное движение шкива со столиком происходит под действием силы натяжения нити \vec{F}'_H , создаваемой грузом. Точки поверхности шкива вращаются с тангенциальным ускорением a_τ , равным ускорению a поступательного движения груза (нить нерастяжима, масса блока пренебрежимо мала). Также равны линейная скорость точек поверхности

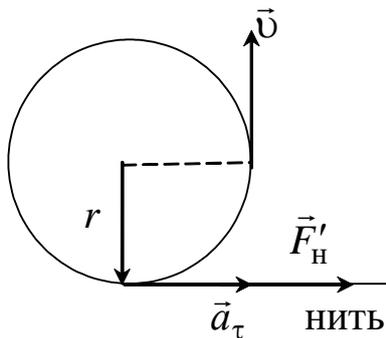


Рис. 2. Поперечное сечение шкива

шкива и скорость v поступательного движения груза. Вращение столика со шкивом является равноускоренным без начальной угловой скорости. Линейные (v, a_τ) и угловые (ω, ε) характеристики в момент времени t связаны соотношениями

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (6)$$

где r – радиус шкива.

4.2.4. Используя значения t , ε , h и r , рассчитайте угол φ поворота радиуса шкива

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{h}{r} \quad (7)$$

и число N его оборотов

$$N = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8)$$

Результаты расчёта косвенных измерений занесите в табл. 1.

4.2.5. Положите на столик стержень так, чтобы его центр масс находился на оси вращения Z . Повторите измерения времени t падения груза с заданной высоты h . Вычислите кинематические характеристики груза и столика со стержнем. Результаты занесите в табл. 2 (аналогична табл. 1).

4.3. Методика расчёта динамических характеристик

Для системы двух связанных тел (шкив со столиком и груз на нити) необходимо записать два динамических уравнения. Поступательное движение груза с ускорением \vec{a} обеспечивается действием на него силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H . Основное уравнение поступательного движения груза массой m в этом случае записывается в виде

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_H. \quad (9)$$

Проецируя его на ось OY , получим формулу для расчета силы натяжения нити:

$$F_H = m(g - a). \quad (10)$$

На столик со шкивом действуют момент силы \vec{M}_H натяжения нити \vec{F}'_H и момент силы $\vec{M}_{тр}$ трения $\vec{F}_{тр}$ в подшипнике шкива (вектор силы трения $\vec{F}_{тр}$ на рис. 1 не приведен). Уравнение динамики вращательного движения шкива со столиком имеет вид

$$\vec{M}_H + \vec{M}_{тр} = J_z \vec{\varepsilon}, \quad (11)$$

где $\vec{M}_H = [\vec{r}\vec{F}'_H]$ – момент силы натяжения нити; J_z – момент инерции шкива со столиком относительно оси Z ; $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение шкива со столиком.

В проекции на ось вращения Z (см. рис. 1) уравнение (11) примет вид

$$M_H - M_{тр} = J_z \varepsilon. \quad (12)$$

Равноускоренное вращение столика и шкива обусловлено действием момента силы натяжения нити

$$M_{\text{H}} = r F'_{\text{H}},$$

где $F'_{\text{H}} = F_{\text{H}}$, так как нить нерастяжима, масса блока пренебрежимо мала.

Следовательно,

$$M_{\text{H}} = r F_{\text{H}} = r m (g - a). \quad (13)$$

Момент силы трения $M_{\text{тр}}$ приведён на установке. Тогда момент инерции J_z шкива со столиком определится соотношением:

$$J_z = \frac{M_{\text{H}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

4.3.1. Рассчитайте динамические характеристики груза и столика со шкивом в обеих сериях опытов, используя значения кинематических характеристик, внесённых в табл. 1 и 2.

Экспериментальное значение момента инерции стержня определите из соотношения

$$J_z^{\text{экс}} = J_{z2} - J_{z1}, \quad (15)$$

где J_{z1} – момент инерции столика со шкивом; J_{z2} – момент инерции столика со шкивом и стержнем на столике.

Результаты измерений занесите в табл. 3.

Таблица 3

Динамические характеристики системы связанных тел

$$m_{\text{ст}} = \quad R = \quad \ell =$$

Характеристики, формула	F_{H} (10)	M_{H} (13)	$M_{\text{тр}}$	J_{z1} (14)	J_{z2} (14)	$J_z^{\text{экс}}$ (15)	$J_z^{\text{теор}}$ (16)	ε_J (17)
	Н	Н·м	Н·м	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	%
Условия опытов								
Без стержня на столике					–			
Со стержнем на столике				–				

4.3.2. Для расчёта теоретического значения момента инерции стержня относительно оси, перпендикулярной к образующей и проходящей через его центр масс, измерьте штангенциркулем

радиус R стержня и его длину ℓ (масса стержня приведена на установке). С учётом параметров стержня рассчитайте теоретическое значение его момента инерции относительно оси вращения:

$$J_z^{\text{теор}} = m_{\text{ст}} \left(\frac{1}{4} R^2 + \frac{1}{12} \ell^2 \right). \quad (16)$$

4.3.3. Оцените расхождение экспериментального и теоретического значения момента инерции стержня по формуле

$$\varepsilon_J = \frac{|J_z^{\text{экс}} - J_z^{\text{теор}}|}{J_z^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

4.4. Проверка закона сохранения энергии

4.4.1. Для одного из двух случаев рассчитайте механическую энергию системы связанных тел и работу момента сил трения. Начальный запас механической энергии системы определяется потенциальной энергией груза массой m , поднятого относительно нулевого уровня ($h = 0$):

$$W_{\text{п}} = mgh. \quad (18)$$

При движении груза эта энергия расходуется на увеличение его кинетической энергии и кинетической энергии вращающегося шкива и столика в первой серии опытов и шкива, столика и стержня на нем во второй серии опытов.

Кинетическая энергия груза в конце поступательного движения:

$$W_{\text{к}}^{\text{пост}} = \frac{mv^2}{2}; \quad (19)$$

кинетическая энергия вращательного движения столика со шкивом:

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2}. \quad (20)$$

Кроме того, при учёте сил трения часть механической энергии затрачивается на работу против этих сил. Работа момента сил трения за время ускоренного вращения столика равна

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}}\varphi. \quad (21)$$

Используя соотношения (18)–(21), проверьте, все ли потери механической энергии системы тел учтены. Расчёты занесите в табл. 4.

Таблица 4

Энергетические характеристики системы связанных тел

Обозначение	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчёта				

5. Сделайте вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Изучение поступательного и вращательного движения тел с помощью маятника Обербека

1. Цель работы: освоить методику экспериментального определения кинематических и динамических характеристик движущихся тел с помощью маятника Обербека.

2. Оборудование: крестообразный маятник (маятник Обербека), набор грузов, нить, секундомер, штангенциркуль, линейка.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–15; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия и формулы для расчета скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, массы, силы, импульса, момента силы, мо-

мента инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения энергии.

4. Выполнение работы

4.1. Описание лабораторной установки

Маятник Обербека состоит из двухступенчатого шкива 1 и четырёх спиц 2, на которые могут крепиться дополнительные грузы 3 (рис. 1). На шкив (малый или большой) наматывается нить, к свободному концу которой подвешивается груз 4 массой m . При своем падении груз 3 разматывает нить и приводит маятник в ускоренное вращательное движение. После падения груза на пол нить соскальзывает со шкива, и движение маятника становится равнозамедленным под действием момента сил трения в оси маятника до его остановки.

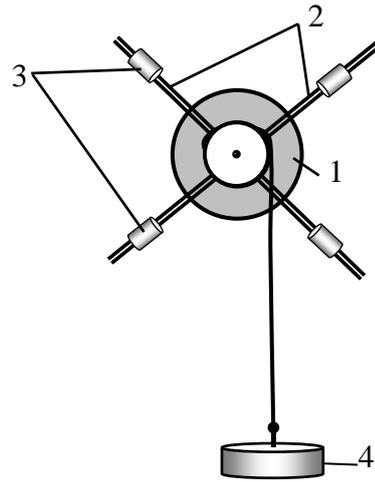


Рис. 1. Схема установки:

1 – шкив; 2 – спицы;

3 – дополнительные грузы;

4 – груз массой m

4.1. Измерения и метод расчёта характеристик поступательного движения груза

4.2.1. Намотайте нить на выбранный шкив. Добавочные грузы на спицах маятника отсутствуют. Задайте высоту h нижнего основания груза относительно «нулевого» уровня ($h_0 = 0$), она во всех опытах должна быть одинаковой (рис. 2). К свободному концу нити подвесьте груз массой m , измерьте время его движения секундомером. Опыт повторите 5 раз. Определите среднее значение времени $\langle t \rangle$ движения груза. Данные измерений и вычислений занесите в табл. 1.

*Результаты измерений и вычислений
характеристик поступательного движения груза*

$h =$

$m =$

№ п/п	$t,$ с	$\langle t \rangle,$ с	$v,$ м/с	$a,$ м/с ²	$F_H,$ Н	$p,$ кг·м/с	$W_{\text{п}},$ Дж	$W_{\text{к}},$ Дж
Формула			(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1								
2								
3								
4								
5								

4.2.2. Для определения скорости v груза и его ускорения a в конце его поступательного движения без начальной скорости используйте уравнения

$$h = \frac{at^2}{2} \quad \text{и} \quad v = at, \quad (1)$$

из которых скорость груза и его ускорение в конце t равноускоренного движения определяются соотношениями:

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

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3)$$

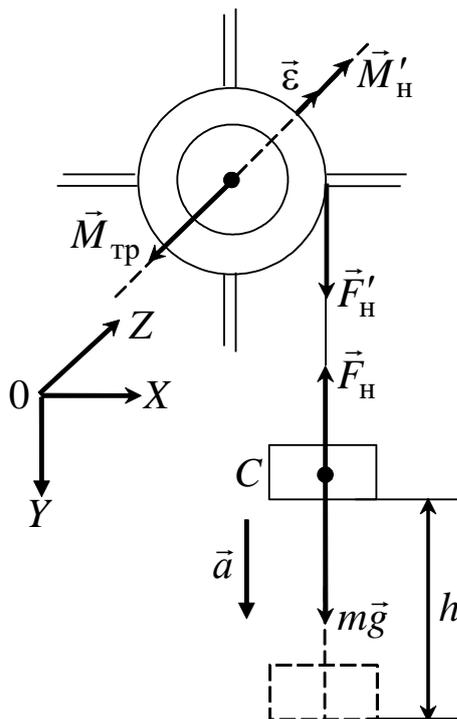


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на груз и шкив маятника

Все характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени $\langle t \rangle$.

4.2.3. Определите силу натяжения нити, учитывая, что равноускоренное движение груза происходит под действием силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H (рис. 2).

При использовании основного уравнения поступательного движения твердого тела

$$m\vec{g} + \vec{F}_H = m\vec{a}$$

расчётная формула для определения силы натяжения нити в проекции на направление движения груза примет вид

$$F_H = m(g - a). \quad (4)$$

Импульс p поступательно движущегося груза в проекции на ось Y зависит от массы груза и скорости его движения:

$$p = m\nu = \frac{2mh}{t}. \quad (5)$$

4.2.4. Рассчитайте потенциальную энергию W_{Π} груза, поднятого относительно «нулевого» уровня на высоту h (начальный запас энергии системы связанных тел):

$$W_{\Pi} = mgh. \quad (6)$$

и кинетическую энергию W_K груза в конце его равноускоренного движения

$$W_K = \frac{m\nu^2}{2} = \frac{2mh^2}{t^2}. \quad (7)$$

Результаты расчёта динамических характеристик поступательного движения груза и полученных значений механической энергии занесите в табл. 1. Сравните полученные значения энергий. Должны ли эти значения быть равными?

4.3. Метод расчёта характеристик вращательного движения крестообразного маятника

Кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника: угловое ускорение ε , угловая скорость ω , угол поворота φ и число оборотов маятника за вре-

мя $\langle t \rangle$ его вращения в условиях данного эксперимента определяются при использовании полученных ранее кинематических характеристик поступательного движения груза (см. табл. 1).

Так как нить не проскальзывает по поверхности шкива, то ускорение a поступательного движения груза и тангенциальное ускорение a_τ точек поверхности шкива совпадают $a_\tau = a$. Тогда угловое ускорение ε с учётом формулы (3) определится соотношением

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (8)$$

а угловая скорость вращения шкива рассчитывается по формуле

$$\omega = \varepsilon t = \frac{2h}{rt}. \quad (9)$$

Угол поворота φ и число оборотов N за время движения груза определяются соответственно из формул

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} = \frac{h}{r}; \quad (10)$$

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{h}{2\pi r}. \quad (11)$$

Вращение крестообразного маятника происходит под действием момента силы \vec{M}_H натяжения нити \vec{F}'_H , направленного вдоль оси вращения в сторону, определяемую правилом правого винта (рис. 3), и момента сил трения $M_{тр}$ (сила трения на рис. 3

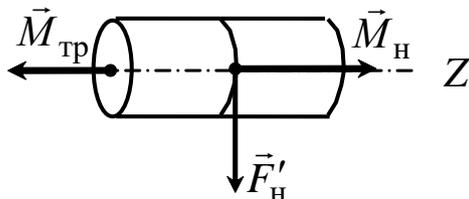


Рис. 3. Схема, поясняющая направления моментов сил натяжения нити и силы трения

не указана). Момент силы тяжести маятника относительно оси, совпадающей с осью вращения, равен нулю. Момент силы натяжения нити

$$M_H = r F'_H,$$

где $F'_H = F_H$, так как нить не растяжима; r – радиус шкива.

Следовательно, момент силы натяжения нити с учётом формулы (4) определится соотношением

$$M_{\text{н}} = r F_{\text{н}} = r m (g - a). \quad (12)$$

Уравнение динамики вращательного движения в проекции на ось вращения крестообразного маятника имеет вид

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = J_z \varepsilon, \quad (13)$$

где J_z – момент инерции маятника относительно оси вращения; ε – его угловое ускорение.

Формула (13) позволяет рассчитать момент инерции маятника на основе результатов экспериментального определения моментов действующих сил:

$$J_z = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

Значение момента сил трения $M_{\text{тр}}$ приведено на установке.

4.3.1. Измерьте штангенциркулем диаметр D шкива, рассчитайте его радиус r . Используя результаты измерения высоты h поднятия груза относительно выбранного уровня и среднее время $\langle t \rangle$ движения груза, рассчитайте кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника. Результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики вращательного движения крестовины

$r =$ $M_{\text{тр}} =$

Характеристики	$\langle t \rangle,$ с	$\varepsilon,$ с^{-2}	$\omega,$ с^{-1}	$\varphi,$ рад	$N,$ об	$M_{\text{н}},$ Н·м	$J_z,$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	$L_z,$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$
Формула		(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(14)	(15)

4.3.2. Рассчитайте динамические характеристики маятника: момент инерции J_z относительно оси вращения, максимальное значение проекции момента импульса L_z маятника на ось вращения

$$L_z = J_z \omega. \quad (15)$$

Сравните полученное значение с моментом импульса $L_z^{\text{ГР}}$ груза относительно оси вращения, движущегося поступательно:

$$L_z^{\text{ГР}} = m v r .$$

Должны ли совпадать эти значения?

4.3.3. Рассчитайте кинетическую энергию вращающегося маятника в конце равноускоренного движения

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2} \quad (16)$$

и работу $A_{\text{тр}}$ момента сил трения

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \varphi . \quad (17)$$

Используя результаты расчётов по формулам (6), (7), (16) и (17), проверьте, все ли потери механической энергии учтены. Результаты расчёта занесите в табл. 3.

Таблица 3

Энергетические характеристики системы тел

Обозначение	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчёта				

5. Сделайте вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Проверка уравнения динамики вращательного движения

1. Цель работы: освоить методику экспериментального определения кинематических и динамических характеристик поступательного и вращательного движения тел с помощью маятника Обербека, проверить основное уравнение динамики вращательного движения.

2. Оборудование: маятник Обербека, набор грузов, нить, секундомер, штангенциркуль, линейка.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–16; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, силы, момента силы, момента инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) понятия потенциальной энергии, кинетической энергии поступательного и вращательного движений; г) закон сохранения энергии.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Маятник Обербека состоит из двухступенчатого шкива 1 (рис. 1) с четырьмя взаимно перпендикулярными стержнями 2. На стержнях могут быть закреплены четыре цилиндрических груза 3 массой m_0 . На шкив (малый или большой) наматывается нить, к свободному концу которой подвешивается груз массой m . При падении груз разматывает нить и приводит маятник в ускоренное вращательное движение.

4.2. Измерения и методика расчёта характеристик поступательного и вращательного движения

Поступательное движение груза m происходит под действием силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H (рис. 1). Второй закон Ньютона для этого случая запишется в виде

$$m\vec{g} + \vec{F}_H = m\vec{a},$$

а в проекции на направление движения груза

$$ma = mg - F_H.$$

Движение груза – прямолинейное с постоянным ускорением, так как в процессе движения m ,

\vec{g} , F_H не изменяются. Тогда сила натяжения нити определяется по формуле

$$F_H = m(g - a), \quad (1)$$

а ускорение a и скорость v в конце равноускоренного движения определяются соответственно по формулам

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

$$v = at = \frac{2h}{t}. \quad (3)$$

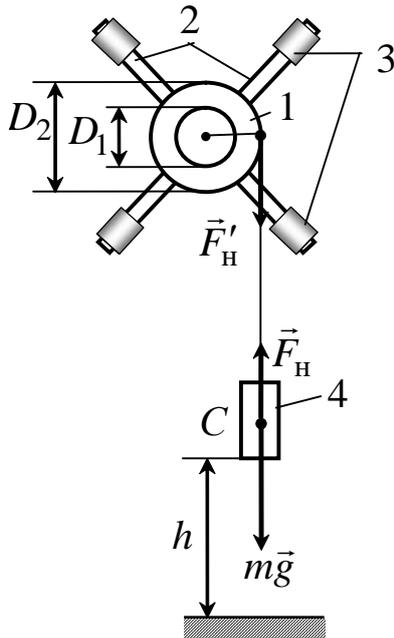


Рис. 1. Схема установки:

- 1 – двухступенчатый вал;
2 – стержни; 3 – грузы m_0 ;
4 – груз массой m

4.2.1. Добавочные грузы m_0 со спиц маятника снимите. Штангенциркулем измерьте диаметры D_1 и D_2 двухступенчатого шкива, рассчитайте их радиусы r_1 и r_2 . Результаты занесите в табл. 1.

Таблица 1

*Результаты измерений и вычислений
кинематических характеристик*

$h =$

r	m	t	v	a	ε	ω	φ
М	КГ	с	м/с	м/с ²	с ⁻²	с ⁻¹	рад
$r_1 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

4.2.2. Запишите массу грузов m_1 и m_2 (указаны на грузах).

4.2.3. Намотайте нить на шкив радиуса r_1 . Высота h нижнего основания груза над поверхностью во всех опытах должна быть одинаковой. К свободному концу нити подвесьте сначала груз массой m_1 , затем груз массой m_2 . Измерьте время движения грузов секундомером.

4.2.4. Намотайте нить на шкив радиуса r_2 и проделайте опыты с обоими грузами.

4.2.5. Используя экспериментальные данные, по формулам (2) и (3) рассчитайте кинематические характеристики поступательного движения грузов скорость v в конце движения и ускорение a .

4.2.6. Кинематические характеристики вращательного движения крестовины угловую скорость ω и угловое ускорение ε определите по соотношениям

$$\omega = \frac{2h}{rt} \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{2h}{rt^2}. \quad (4)$$

4.2.7. Используя значения h и r , рассчитайте угол φ поворота шкива

$$\varphi = \frac{h}{r}. \quad (5)$$

Результаты расчёта занесите в табл. 1.

4.3. Расчёт динамических характеристик

Равноускоренное вращение маятника обусловлено действием момента силы натяжения нити

$$M_{\text{н}} = rF'_{\text{н}},$$

где $F'_{\text{н}} = F_{\text{н}}$, так как нить нерастяжима.

Следовательно, с учетом формулы (1) получим выражение для определения момента силы натяжения:

$$M_{\text{н}} = rF_{\text{н}} = r m (g - a). \quad (6)$$

Момент силы тяжести маятника относительно оси Z , совпадающей с осью вращения, равен нулю. Кроме того, при вращении маятника действует сила трения, момент $\vec{M}_{\text{тр}}$ которой направлен противоположно $\vec{M}_{\text{н}}$ (рис. 2).

Уравнение динамики вращательного движения в проекции на направление оси вращения маятника имеет вид

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = J_z \varepsilon, \quad (7)$$

где J_z – момент инерции маятника относительно оси Z ; ε – его угловое ускорение.

Формула (7)

позволяет рассчитать момент инерции маятника на основе результатов экспериментального определения моментов действующих сил:

$$J = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon} = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где $M = M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}$ – значение результирующего момента сил. Значения моментов сил трения $M_{\text{тр}1}$ (нить намотана на шкив радиуса r_1) и $M_{\text{тр}2}$ (нить намотана на шкив радиуса r_2) приведены на установке.

4.3.1. Пользуясь данными табл. 1, рассчитайте динамические характеристики груза и маятника Обербека. Определите среднее значение момента инерции маятника без грузов на спицах:

$$\langle J_z \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n J_{zi}}{n}. \quad (9)$$

Результаты расчёта динамических характеристик груза и маятника занесите в табл. 2.

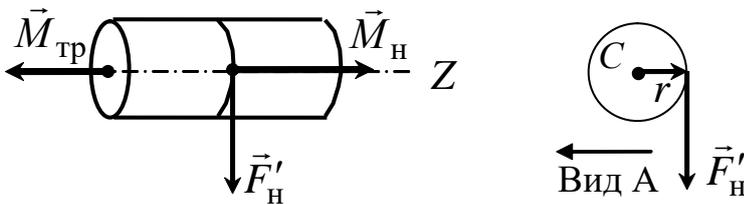


Рис. 2. Схема, поясняющая направления моментов сил натяжения нити и силы трения

Динамические характеристики груза и маятника

$M_{\text{тр1}} =$

$M_{\text{тр2}} =$

$M_{\text{тр3}} =$

r	m	F_{H}	M_{H}	M	ε	J_z	$\langle J_z \rangle$
М	кг	Н	Н·м	Н·м	с ⁻²	кг·м ²	кг·м ²
$r_1 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

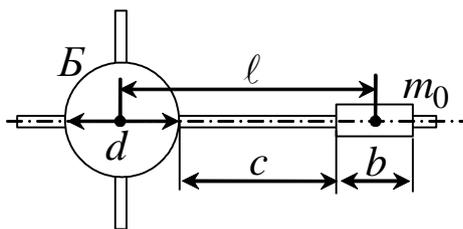


Рис. 3. Расположение добавочного груза на спице

4.3.2. Поместите на спицы маятника дополнительные грузы массой m_0 и, изменяя положение этих грузов относительно оси вращения, измените момент инерции маятника. Значение момента инерции маятника $\langle J_z \rangle$ без дополнительных грузов на спицах определено в табл. 2.

Положение грузов на спицах задается расстоянием ℓ между центрами масс барабана B маятника и груза m_0 (рис. 3)

$$\ell = d/2 + c + b/2. \quad (10)$$

Рекомендуется располагать грузы m_0 сначала вплотную к барабану B (положение 1), затем посередине спиц (положение 2) и на конце спиц (положение 3). Грузы следует надежно закреплять на спицах.

4.3.3. Намотайте нить на шкив радиуса r_2 , прикрепите к нити груз массой m_2 , добавочные грузы закреплены в положении 1.

Высоту h груза над поверхностью стола не изменяйте. Измерьте время движения груза и занесите его во вторую строку табл. 3.

Таблица 3

Зависимость углового ускорения от момента инерции маятника

№ п/п	ℓ	t	ε	M_H	M	J_z
	м	с	с ⁻²	Н·м	Н·м	кг·м ²
1	—	*	*	**	**	***
2						
3						
4						

* – берётся из табл. 1, четвертая строка;

** – берётся из табл. 2, четвертая строка;

*** – берётся из табл. 2 среднее значение $\langle J_z \rangle$.

4.3.4. Повторите измерение времени для 2-го и 3-го положений добавочных грузов. Рассчитайте угловое ускорение ε , момент силы натяжения нити M_H , результирующий момент сил $M = M_H - M_{трз}$ и момент инерции маятника для каждого опыта.

4.4. Проверка уравнения динамики вращательного движения

Проверить основное уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела можно следующим образом:

а) анализируя зависимость $\varepsilon = f(M)$ при неизменном моменте инерции маятника J_z ;

б) анализируя зависимость $\varepsilon = f(J_z)$ при неизменном моменте сил.

Обработку результатов совместных измерений проводят графическим методом. При построении графиков в данной работе используют декартовую систему координат. На координатных осях обозначают величины и единицы их измерения. Масштабные величины (можно разные) наносятся на осях равномерно. Начало координат и масштаб выбираются так, чтобы была использована вся площадь графика. Точки соединяются плавной

кривой (в случае линейной зависимости – прямая) так, чтобы они находились по обе стороны на одинаковом расстоянии от линии графика. Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге или с помощью компьютера.

4.4.1. По результатам табл. 2 постройте график $\varepsilon = f(M)$. Определите по графику момент инерции маятника

$$J_{z\text{граф}} = \frac{\Delta M}{\Delta \varepsilon}.$$

4.4.2. Постройте график $\varepsilon = f(J_z)$. Учтите, что момент внешних сил в этой серии опытов примерно постоянный.

4.4.3. Сделайте вывод: а) о влиянии условий опытов на значения кинематических и динамических характеристик; б) о выполнении уравнения динамики вращательного движения.

5. Сделайте вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Изучение ударного взаимодействия твердых тел

1. Цель работы: определение момента инерции стержня на основе законов сохранения момента импульса и механической энергии.

2. Оборудование: закреплённый на горизонтальной оси стальной стержень, стальной шарик, электромагнит, секундомер, штангенциркуль, измерительная линейка.

3. Подготовка к работе: прочитать в [1] §§ 9, 13; [2] §§ 5.2–5.3; ответить на вопросы для самоподготовки 17–22.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия и формулы для расчёта физических величин таких как скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, масса, сила, момент силы, импульс, момент импульса, момент инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного

движения; в) законы сохранения момента импульса и механической энергии; г) уметь пользоваться измерительными приборами.

4. Выполнение работы

4.1. Описание лабораторной установки

Стальной прямоугольный стержень может вращаться с малым трением вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр масс. Это вращение происходит за счёт кинетической энергии шарика массой m , свободно падающего с высоты h , на которой он удерживается электромагнитом (рис.1). При выключении электромагнита шарик приобретает скорость v и ударяется о горизонтально расположенный стержень в точке, отстоящей от оси вращения на расстоянии r . Место упругого удара определяют по небольшой вмятине в тонком слое пластины, нанесённом на стержень. Число оборотов N стержня, которое он сделает до полной остановки, определяется с помощью закреплённого на стене лимба.

4.1. Методика измерений и расчёта кинематических характеристик

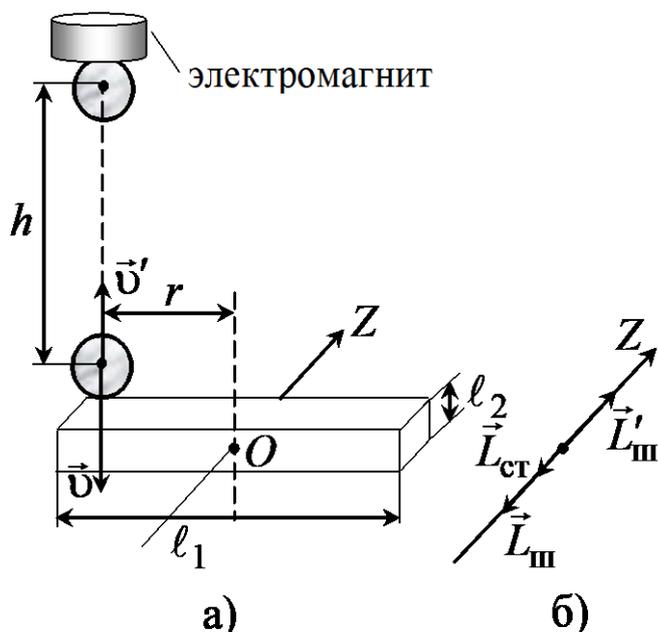


Рис. 1. Схема установки (а) и направления векторов момента импульса шарика и стержня (б): $\vec{L}_{ш}$ – до удара; $\vec{L}_{ст}$ и $\vec{L}'_{ш}$ – после удара

4.1.1. Измерьте высоту h падения шарика (расстояние от наконечника электромагнита до стержня в его горизонтальном положении с поправкой на диаметр d шарика). Масса m шарика приведена на установке.

4.1.2. Укрепите шарик на электромагните, стержень расположите горизонтально. Шарик должен падать на конец

стержня, покрытый тонким слоем пластилина. Выключите электромагнит.

4.1.3. Для определения времени t вращения стержня секундомер включите после удара шарика о конец стержня и выключите его в момент полной остановки стержня. Определите число N оборотов стержня за этот промежуток времени.

4.1.4. Измерьте расстояние r от места удара шарика о стержень до оси вращения (место удара определяется по вмятине в слое пластилина на конце стержня).

4.1.5. Опыт повторите не менее пяти раз. Рассчитайте скорость v шарика перед ударом

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

По средним значениям времени $\langle t \rangle$ и числа оборотов $\langle N \rangle$ определите начальную угловую скорость ω_0 стержня:

$$\omega_0 = \frac{4\pi\langle N \rangle}{\langle t \rangle} \quad (2)$$

и его угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_t - \omega_0}{\Delta t} = -\frac{\omega_0}{t}. \quad (3)$$

Данные измерений и расчётов занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и расчёта кинематических характеристик шарика и стержня

$h =$

$m =$

$r =$

№ п/п	t	$\langle t \rangle$	N	$\langle N \rangle$	v	ω_0	ε
	с	с	об	об	м/с	с ⁻¹	с ⁻²
1							
2							
...							
5							

4.2. Определение динамических характеристик шарика и стержня

При кратковременном взаимодействии (ударе) систему тел «шарик – стержень» можно считать *квазизамкнутой* и применить к ней закон сохранения момента импульса. Вектор момента импульса шарика относительно точки O перед ударом равен

$$\vec{L}_{\text{ш}} = [\vec{r}, m\vec{v}], \quad (4)$$

где r – расстояние от места удара шарика до оси вращения стержня; m – масса шарика; v – скорость шарика перед ударом (1).

Стержень до удара шарика покоится, поэтому его момент импульса равен нулю. После упругого соударения шарик отскакивает от стержня вертикально вверх со скоростью \vec{v}' и моментом импульса $\vec{L}'_{\text{ш}}$:

$$\vec{L}'_{\text{ш}} = [\vec{r}, m\vec{v}'], \quad (5)$$

а стержень начинает вращаться относительно оси Z с начальной угловой скоростью ω_0 (2), приобретая момент импульса $\vec{L}_{\text{ст}}$

$$\vec{L}_{\text{ст}} = J_z \vec{\omega}_0, \quad (6)$$

где J_z – момент инерции стержня относительно оси вращения Z .

Направления векторов указанных моментов импульса приведены на рис. 1, б.

Из закона сохранения момента импульса системы тел «шарик – стержень» следует

$$[\vec{r}, m\vec{v}] = J_z \vec{\omega}_0 + [\vec{r}, m\vec{v}']. \quad (7)$$

Закон сохранения момента импульса в проекции на ось Z запишется в виде

$$r m v = J_z \omega_0 - r m v'. \quad (8)$$

Полагая удар шарика о стержень *абсолютно упругим*, а систему «шарик – стержень» *консервативной*, применяем к ней закон сохранения механической энергии (потенциальная энергия си-

стемы относительно уровня, проходящего через точку O , не изменяется):

$$\frac{m v^2}{2} = \frac{J_z \omega_0^2}{2} + \frac{m v'^2}{2}, \quad (9)$$

где $m v^2 / 2$ и $m v'^2 / 2$ – кинетическая энергия шарика до удара и после него, соответственно; $J_z \omega_0^2 / 2$ – начальная кинетическая энергия стержня. Решая систему уравнений (8) и (9), получаем расчётную формулу для *момента инерции стержня*:

$$J_z = \frac{mr}{\omega_0} (2v - \omega_0 r). \quad (10)$$

4.2.1. Рассчитайте динамические характеристики системы: момент импульса $L_{\text{ш}}$ шарика до удара, момент импульса $L_{\text{ст}}$ стержня после удара, момент инерции J_z стержня, определенный экспериментально. Результаты запишите в табл. 2.

Таблица 2

Расчёт динамических характеристик шарика и стержня

$m_{\text{ст}} =$

$\ell_1 =$

$\ell_2 =$

$L_{\text{ш}}$	$L_{\text{ст}}$	J_z	$J_z^{\text{теор}}$	ε_J	$W_{\text{к}}^{\text{ш}}$	$W_{\text{к}}^{\text{ст}}$	$A_{\text{тр}}$	$M_{\text{тр}}$
кг·м ² /с	кг·м ² /с	кг·м ²	кг·м ²	%	Дж	Дж	Дж	Н·м

4.2.2. Измерьте параметры стержня ℓ_1 и ℓ_2 (см. рис. 1, а), масса стержня $m_{\text{ст}}$ приведена на установке.

4.2.3. Рассчитайте теоретическое значение момента инерции $J_z^{\text{теор}}$ стержня по формуле

$$J_z^{\text{теор}} = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} (\ell_1^2 + \ell_2^2). \quad (11)$$

4.2.4. Рассчитайте отклонение результатов экспериментального определения (10) и теоретического расчёта (11) момента инерции стержня:

$$\varepsilon_J = \frac{|J_z^{\text{теор}} - J_z|}{J_z^{\text{теор}}} \cdot 100\% . \quad (11)$$

4.2.5. Определите кинетическую энергию $W_K^{\text{ш}}$ шарика перед ударом и кинетическую энергию $W_K^{\text{ст}}$ стержня после удара.

4.2.6. Рассчитайте работу момента сил трения

$$A_{\text{тр}} = \Delta W_K^{\text{ст}} = \frac{J_z \omega_0^2}{2} \quad (12)$$

и момент сил трения $M_{\text{тр}}$, действующий на стержень при его вращении:

$$M_{\text{тр}} = \frac{A_{\text{тр}}}{\varphi} . \quad (13)$$

5. Сделайте вывод.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Какие погрешности называют случайными и систематическими? Как поступают с грубыми погрешностями?
2. От чего зависят надежность и абсолютная погрешность $\Delta x_{\text{сл}}$?
3. Как определяется приборная погрешность $\Delta x_{\text{пр}}$ и как рассчитать абсолютную погрешность прямых измерений?
4. Как рассчитывается относительная погрешность косвенных измерений?
5. Какое движение называют поступательным? Вращательным? Приведите кинематические уравнения этих движений.
6. Как определяются векторы скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} при поступательном движении?
7. Как записывается основной закон динамики поступательного движения?
8. Как определяются векторы угловой скорости $\vec{\omega}$ и углового ускорения $\vec{\varepsilon}$ при вращательном движении? Как направлены эти векторы?

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

10. Для каких точек вращающихся твёрдых тел тангенциальное ускорение a_τ одинаково?

11. Как определяется момент силы натяжения нити относительно оси вращения?

12. Каков физический смысл момента инерции? Приведите пример расчёта момента инерции тела относительно неподвижной оси, проходящей через центр масс.

13. Как формулируется теорема Штейнера?

14. Как изменится момент инерции стержня или добавочных грузов на спицах, если изменить положение их центра масс относительно оси вращения?

15. Как записывается уравнение динамики вращательного движения?

16. Можно ли применять закон сохранения механической энергии при наличии диссипативных сил?

17. Каков характер движения стержня и шарика? Запишите кинематические уравнения этих движений.

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

19. Как определяется момент импульса твёрдого тела относительно оси вращения?

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

21. Как записывается закон сохранения момента импульса для системы взаимодействующих тел «шарик – стержень»?

22. Как записывается закон сохранения энергии системы тел «шарик – стержень»? Почему в это уравнение не входит потенциальная энергия тел системы?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И. В. Курс физики : в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям и специальностям / И. В. Савельев. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2007. – 352 с. – Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – Москва : Академия, 2007. – 560 с.

Составители

Лавряшина Таисия Васильевна
Андрей Алексеевич Фофанов
Ирина Валентиновна Цвеклинская

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Лабораторный практикум К-303.1
по дисциплине «Физика»
для обучающихся всех специальностей
и направлений бакалавриата всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 10.02.2020. Формат 60×84/16.

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

Тираж 20 экз. Заказ _____.

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

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