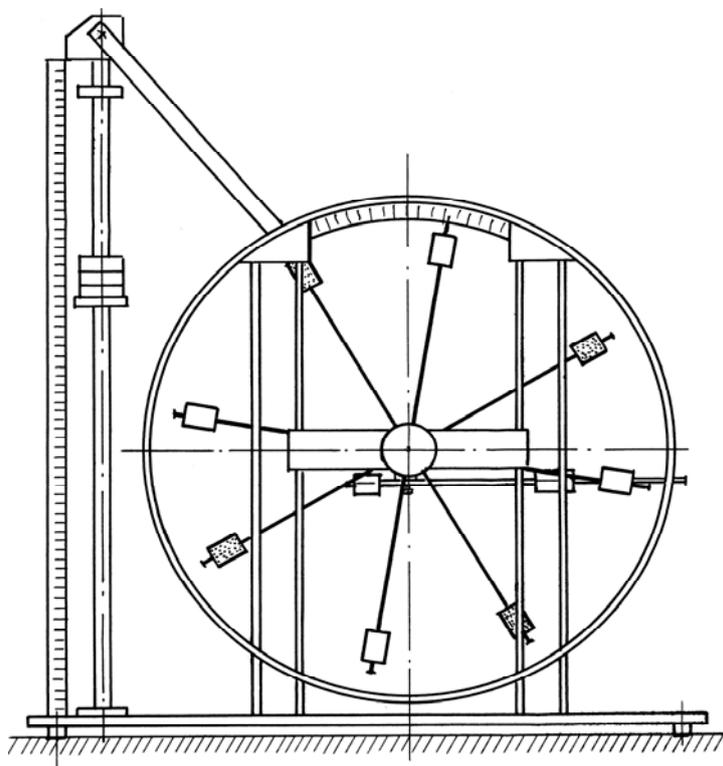


И.В. Баранов

В.А. Самолетов

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МЕХАНИКЕ**



Санкт-Петербург
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

И.В. Баранов

В.А. Самолетов

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МЕХАНИКЕ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

УДК 530

Баранов И. В., Самолетов В. А. Физика. Лабораторные работы по механике: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 111 с.

Дано краткое теоретическое обоснование методов измерения, изложен порядок проведения лабораторных работ и обработки результатов измерений.

Предназначены для студентов направлений бакалавриата: 01.03.02, 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.03, 12.03.05, 13.03.02, 14.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 15.03.06, 16.03.01, 16.03.03, 18.03.02, 18.03.04, 19.03.01, 19.03.02, 19.03.03, 23.03.02, 23.03.03, 27.03.04, 27.03.05, 12.05.01 очной и заочной форм обучения.

Рекомендовано к печати Советом естественнонаучного факультета протокол №1 от 24.01.2017 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017

© Баранов И.В., Самолетов В.А. 2017

ВВЕДЕНИЕ

Лаборатория механики предназначена для изучения основных разделов классической механики, ознакомления с техникой проведения простейших экспериментов и средствами измерений механических величин, а также для получения навыков обработки результатов измерения и способов их представления.

Проведение лабораторных работ позволяет студентам глубже понять основные законы механики и показывает возможности применения их для решения конкретных технических задач.

В методических указаниях дано описание девяти лабораторных работ. В работах 1.1, 1.2 студенты измеряют объем и плотность твердого тела и овладевают приемами расчета погрешностей прямых многократных и косвенных измерений. В остальных семи работах представлены разделы классической механики: кинематика поступательного и вращательного движения (работы 2.1 и 2.2), динамика материальной точки (работы 3.1 и 3.2), динамика вращательного движения твердого тела (работы 4.1 и 4.2), а также колебательное движение физического маятника (работа 5.1).

Расчет погрешностей измерений проводится обязательно в лабораторных работах 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2. В остальных работах расчет погрешностей не является обязательным.

Все работы, выполняемые в лаборатории механики, рассчитаны на два учебных часа.

Защита лабораторных работ проводится на плановых занятиях. Во время защиты студент сдает отчет, содержащий все пункты задания, и отвечает на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях к выполненной работе.

Инструктаж по технике безопасности работы в лаборатории механики проводится преподавателем на первом занятии.

Для удобства пользования методическими указаниями в описании каждой работы приводится рекомендуемая литература, а приложения являются общими для всех работ.

СТЕНД ЛАБОРАТОРИИ МЕХАНИКИ

Особенностью лаборатории механики является то, что все работы, за исключением работ по измерению плотности и объема твердого тела, выполняются на типовых стендах, что позволяет всей группе студентов одновременно делать работы на одну тему. В каждой лабораторной работе допускается широкий набор исходных параметров, поэтому каждая бригада студентов выполняет индивидуальное техническое задание.

Лаборатория механики оснащена тринадцатью типовыми стендами (рис. 1).

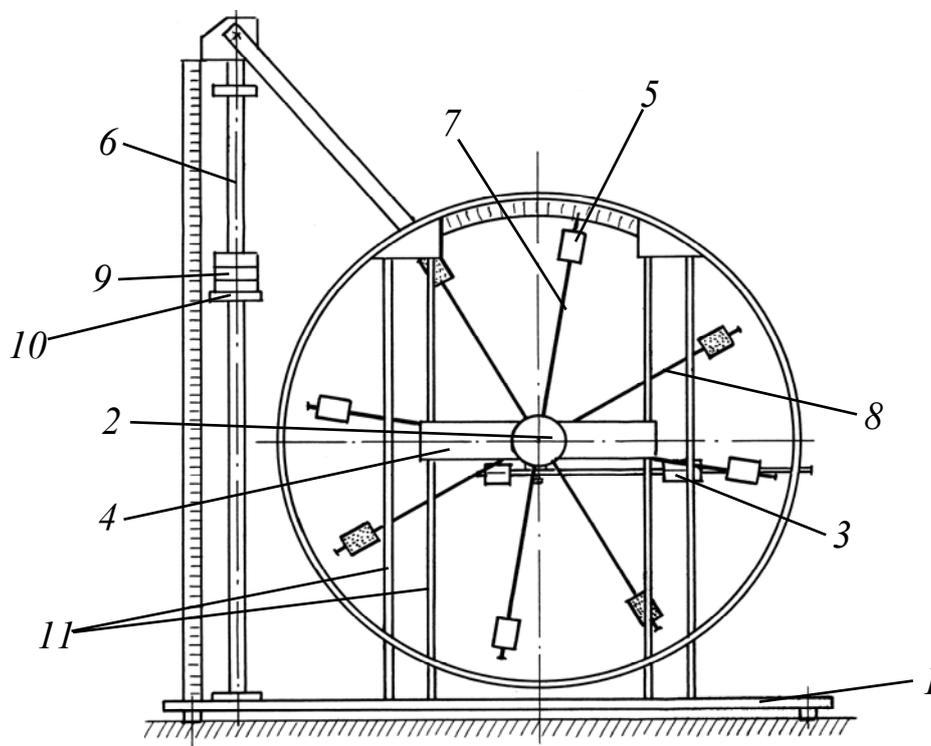


Рис. 1. Стенд лаборатории механики (общий вид):

1 – основание; 2 – рукоятка сцепления крестовин; 3 – устройство принудительного трения; 4 – поперечина; 5 – груз крестовины; 6 – трубчатая направляющая; 7 – передняя крестовина; 8 – задняя крестовина; 9 – шайбы каретки; 10 – каретка; 11 – система передних стоек.

Масса каретки ($47,0 \pm 1,0$) г; масса шайбы на каретке ($220,0 \pm 1,0$) г; масса груза крестовины ($402,0 \pm 1,0$) г; диаметр ступицы ($46,0 \pm 1,0$) мм.

Основными элементами конструкции стенда являются основание 1, система стоек 5 и трубчатая направляющая 6, по которой перемещается каретка 10 с шайбами 9. К системе стоек спереди и сзади прикреплены два защитных обруча.

Внутри системы стоек размещены две соосно вращающиеся крестовины 7 и 8, а также рычажное устройство принудительного трения 3. Каретка с грузами связана со ступицей передней крестовины нитью, проходящей через блок, установленный в верхней части направляющей 6. При вращении передней крестовины нить наматывается на ступицу. Ступица – это массивный цилиндр, в котором закреплены спицы крестовин.

Система вращающихся крестовин

Каждая крестовина состоит из ступицы в виде массивного цилиндра, в котором закреплены четыре спицы с грузами 5. Грузы могут перемещаться вдоль спиц и фиксироваться на них прижимными винтами. На спицах через 25 мм нанесены кольцевые риски, которые позволяют устанавливать каждый груз на заданном расстоянии от оси вращения. Перемещая грузы по спицам, удастся изменять моменты инерции крестовин в широких пределах. Ступицы крестовин насажены на общую ось, состоящую из соосно расположенных неподвижного стержня и трубки. Передняя крестовина связана с трубкой, а задняя – со стержнем. Трубка и стержень имеют резьбовое соединение. Благодаря этому, поворачивая трубку рукояткой сцепления 2, удастся сблизить ступицы до плотного касания торцевых фрикционных шайб, либо удалять их друг от друга. Вращение рукоятки ограничено. При повороте ее до упора по часовой стрелке крестовины входят в зацепление и вращаются совместно, а при повороте против часовой стрелки разъединяются и вращаются независимо.

Передняя крестовина может работать как физический маятник при несимметричном расположении грузов. Для измерения отклонения маятника в верхней зоне стоек установлена шкала с ценой деления в один угловой градус, а на конце одной из спиц вмонтирована стрелка.

Балансировка крестовин. Риски на спицах дают только приближенное положение груза. Поэтому после установки всех грузов на заданных рисках необходимо, отсоединив нить и тормозное устрой-

во от ступиц крестовин, провести точную балансировку каждой пары грузов на крестовинах. Для этого следует расположить спицы произвольно выбранной пары противоположных грузов горизонтально и, перемещая один из грузов вдоль спицы, найти такое положение груза, при котором крестовина не будет самопроизвольно вращаться. Нужно надежно закрепить грузы стопорными винтами, а затем проделать такую же операцию со второй парой грузов.

Каретка с шайбами

Каретка *10* с шайбами *9* перемещается вдоль трубчатой направляющей *б* с продольным разрезом. Нить, на которой подвешена каретка, проходит внутри трубки, а затем через блок наматывается на ступицу передней крестовины.

На каретку *10* может устанавливаться до четырех шайб (пустая каретка, с одной, двумя, тремя, четырьмя шайбами). Каждая шайба снабжена стопорным винтом, что позволяет неиспользуемые шайбы закреплять в верхней части направляющей. Движение каретки может начинаться с различной высоты. Для отсчета ее координаты направляющая снабжена шкалой с ценой деления 1 мм.

Устройство принудительного трения

Устройство расположено на перекладине задних стоек и воздействует на заднюю крестовину. Оно представляет собой горизонтальный рычаг первого рода (рис. 2).

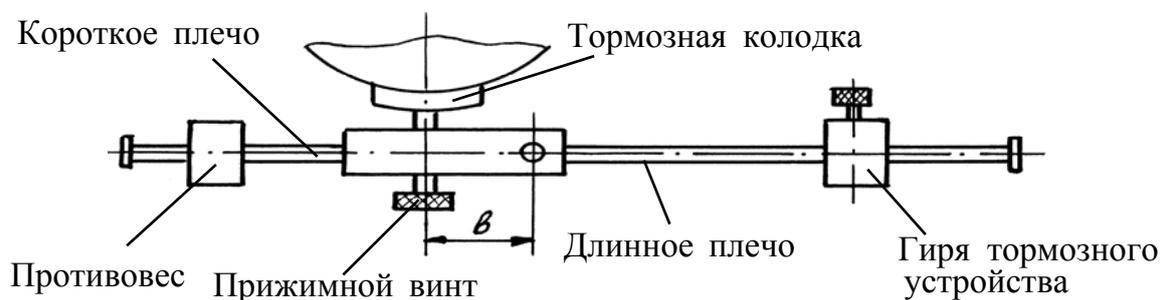


Рис. 2. Устройство принудительного трения
 Масса гири $(140,0 \pm 1,0)$ г ; масса противовеса $(140,0 \pm 1,0)$ г .

По длинному плечу рычага перемещается гиря со стопорным винтом. По короткому плечу рычага по резьбе плавно двигается противовес. Со стороны короткого плеча на рычаге на расстоянии $b = 20$ мм от оси вращения крепится тормозная колодка, которая прижимается к ступице крестовины силой нормального давления. Ступица и колодка образуют трущуюся пару, обеспечивая при вращении регулируемое трение покоя либо скольжения. Изменение силы трения производится перемещением гири по длинному плечу.

Для установки заданной силы нормального давления на длинном плече рычага нанесены кольцевые риски через каждые 20 мм.

Настройка тормозного устройства. Для настройки тормозного устройства необходимо провести следующие операции.

1. Перевести гирю длинного плеча рычага в крайнее левое положение ($x = 0$).

2. Вращая прижимной винт, опустить тормозную колодку и вывести ее из контакта со ступицей.

3. Вращая противовес, расположенный на коротком плече рычага, найти такое его положение, при котором рычаг будет находиться в равновесии в горизонтальном положении.

4. Вращая прижимной винт, ввести тормозную колодку в контакт со ступицей так, чтобы рычаг оставался в горизонтальном положении.

При правильной настройке тормозного устройства расчет силы нормального давления, которую гиря обеспечивает трущейся паре, производится по формуле

$$N = \frac{x}{b} m_{\Gamma} g,$$

где x – плечо гири; m_{Γ} – масса гири, $m_{\Gamma} = (140,0 \pm 1,0)$ г; b – плечо силы N , $b = (20,0 \pm 0,5)$ мм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.1

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРОСТЕЙШЕЙ ФОРМЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерить диаметр и высоту цилиндра, его массу и по ним рассчитать плотность материала.

2. Представить результаты измерения плотности материала с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ:

- образец цилиндрической формы;
- штангенциркуль;
- весы.

Характеристики средств измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Штангенциркуль	150 мм	0,1 мм/дел.	–	0,1 мм
Весы электронные	500 г	0,1 г/дел.	–	0,1 г

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Плотность вещества равна отношению массы к объему

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где m – масса тела, кг; V – объем тела, м³.

Объем цилиндра диаметром D и высотой H

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H. \quad (2)$$

Таким образом, плотность материала цилиндрического образца

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 H}. \quad (3)$$

Используемые в работе образцы за счет погрешностей изготовления имеют отклонения от формы прямого кругового цилиндра: бочкообразность, прогиб, конусность, эллиптичность поперечного сечения, а также непараллельность торцевых поверхностей (см. рис. 1). Поэтому диаметры D образца, измеренные в разных сечениях и на разных образующих, будут различаться. Также будут различаться и высоты H на разных продольных сечениях.

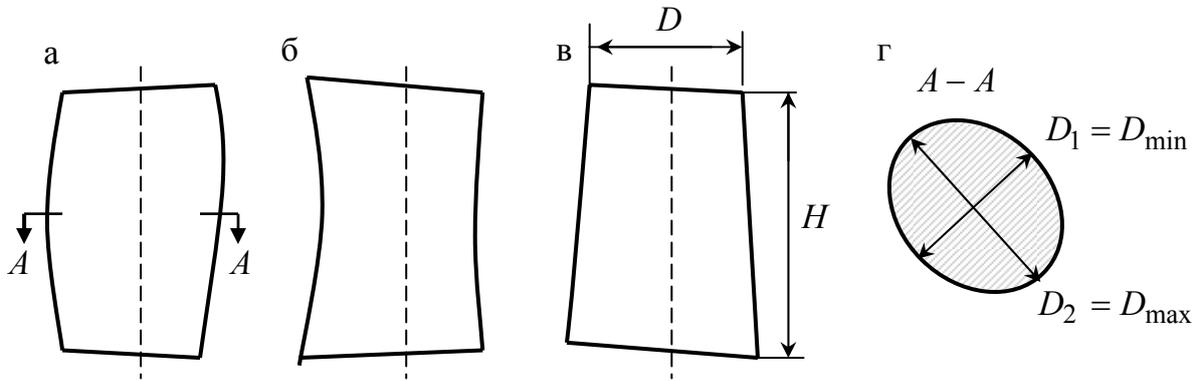


Рис. 1. Отклонения образцов по форме:
а – бочкообразность; б – прогиб; в – конусность;
г – эллиптичность поперечного сечения.

Для уменьшения случайной погрешности измерения диаметра D и высоты H , будем диаметр D измерять пять раз, высоту H – три раза. Массу образца достаточно измерить один раз.

Для расчета плотности в формуле (3) будем использовать средние значения диаметра \bar{D} и высоты \bar{H} образца.

Поэтому окончательная расчетная формула для плотности примет вид

$$\rho = \frac{4m}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}. \quad (4)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить пять раз диаметр D образца в различных сечениях по высоте и на разных образующих цилиндра (см. рис. 1).
2. Измерить три раза высоту цилиндра H по разным образующим.
3. Измерить один раз массу m образца.
Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр образца	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Значение диаметра D_i , мм					
Высота образца	H_1	H_2	H_3	–	
Значение измеренной высоты H_i , мм				–	
Масса образца m , г					

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 2 рассчитать средний диаметр цилиндра \bar{D} для пяти измерений

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{1}{5} (D_1 + \dots + D_5). \quad (5)$$

2. Рассчитать среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения диаметра

$$S_{\bar{D}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(D_1 - \bar{D})^2 + \dots + (D_5 - \bar{D})^2}{5(5-1)}}. \quad (6)$$

3. Рассчитать доверительный интервал случайной погрешности (случайную погрешность) измерения диаметра D для надежности $\alpha = 0,95$

$$\Delta_{\bar{D}} = t_{\alpha n} S_{\bar{D}}, \quad (7)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента; для пяти измерений $t_{\alpha n} = 2,78$ (см. метод. указ. [1]).

4. Рассчитать полную абсолютную погрешность измерения диаметра

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{\bar{D}}^2 + \left(\frac{2}{3}\Delta_{иD}\right)^2}, \quad (8)$$

где $\Delta_{иD}$ – инструментальная погрешность измерения диаметра.

В табл. 1 находим для штангенциркуля $\Delta_{иD} = 0,1$ мм.

5. Рассчитать относительную погрешность измерения диаметра в процентах

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta_D}{D} 100. \quad (9)$$

6. Записать результат измерения диаметра в виде (см. прил. 3)

$$D = (\dots \pm \dots) \text{ мм}; \quad \varepsilon_D = \dots\%; \quad \alpha = 0,95 \quad (10)$$

7. По данным табл. 2 рассчитать среднюю высоту цилиндра \bar{H} для трех измерений

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i = \frac{1}{3}(H_1 + H_2 + H_3). \quad (11)$$

8. Рассчитать СКО результата измерения высоты

$$S_{\bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(H_1 - \bar{H})^2 + (H_2 - \bar{H})^2 + (H_3 - \bar{H})^2}{3(3-1)}}. \quad (12)$$

9. Рассчитать случайную погрешность измерения высоты образца для надежности $\alpha = 0,95$.

$$\Delta_{\bar{H}} = t_{\alpha n} S_{\bar{H}}, \quad (13)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента; для трех измерений $t_{\alpha n} = 4,30$ (см. метод. указ. [1]).

10. Рассчитать полную абсолютную погрешность измерения высоты

$$\Delta_H = \sqrt{\Delta_{\bar{H}}^2 + \left(\frac{2}{3}\Delta_{иH}\right)^2}, \quad (14)$$

где $\Delta_{иH}$ – инструментальная погрешность измерения высоты образца.

В табл. 1 находим для штангенциркуля $\Delta_{иH} = 0,1$ мм.

11. Рассчитать относительную погрешность измерения высоты в процентах

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta_H}{H} 100. \quad (15)$$

12. Записать результат измерения высоты в виде (см. прил. 3)

$$\boxed{H = (\dots \pm \dots) \text{ мм}; \quad \varepsilon_H = \dots\%; \quad \alpha = 0,95} \quad (16)$$

13. В табл. 1 найти инструментальную погрешность измерения массы образца $\Delta_{им}$, которая дана для надежности $\alpha = 1$.

14. Найти абсолютную и относительную погрешности измерения массы в процентах для надежности $\alpha = 0,95$. В соответствии с рекомендациями методических указаний [1]

$$\Delta_m = \frac{2}{3}\Delta_{им}; \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta_m}{m} 100. \quad (17)$$

15. Записать результат измерения массы в виде (см. прил. 3)

$$\boxed{m = (\dots \pm \dots) \text{ кг}; \quad \varepsilon_m = \dots\%; \quad \alpha = 0,95} \quad (18)$$

16. Рассчитать плотность материала образца

$$\bar{\rho} = \frac{4m}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}. \quad (19)$$

17. Плотность материала определяется путем косвенных измерений по формуле (19), в которую входят прямо измеряемые величины D , H , m . Формула (19) представляет собой одночлен, поэтому в соответствии с рекомендациями методических указаний [1] целесообразно вначале вычислить относительную погрешность измерения в процентах

$$\varepsilon_{\rho} = \sqrt{(2\varepsilon_D)^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_m^2}. \quad (20)$$

Для этого в формулу (20) все относительные погрешности следует подставить в процентах, а затем рассчитать абсолютную погрешность

$$\Delta_{\rho} = \frac{\varepsilon_{\rho} \bar{\rho}}{100}. \quad (21)$$

18. Записать результат измерения плотности в виде (см. прил. 3)

$$\rho = (\dots \pm \dots) \text{ кг/м}^3; \quad \varepsilon_{\rho} = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$$

Результатом работы являются:

Плотность материала с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1 и 2.
2. Расчет плотности материала образца с подробным расчетом погрешностей измерения.
3. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о прямых и косвенных измерениях. Погрешность измерения. Абсолютная и относительная погрешности. Случайные и систематические погрешности.

Литература: [1, п. 1].

2. Инструментальная погрешность и ее учет при оценке погрешности результата измерения.

Литература: [1, п. 2].

3. Последовательность обработки результатов измерений при прямых многократных измерениях.

Литература: [1, п. 3].

4. Последовательность обработки результатов измерений при косвенных измерениях.

Литература: [1, п. 4].

5. Правила округления погрешности и измеряемой величины.

Литература: [1, п. 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМА ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРОСТЕЙШЕЙ ФОРМЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерить диаметр и высоту цилиндра и по ним рассчитать его объем.

2. Представить результаты измерения объема с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ:

– образец цилиндрической формы;

– штангенциркуль.

Характеристика средства измерения представлена в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Штангенциркуль	150 мм	0,1 мм/дел.	–	0,1 мм

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Объем цилиндра диаметром D и высотой H

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H . \quad (1)$$

Используемые в работе образцы за счет погрешностей изготовления имеют отклонения формы от прямого кругового цилиндра: бочкообразность, прогиб, конусность, эллиптичность поперечного сечения, а также непараллельность торцевых поверхностей (см. рис. 1). Поэтому диаметры D образца, измеренные в разных сечениях и на разных образующих будут различаться. Также будут различаться и высоты H на разных продольных сечениях.

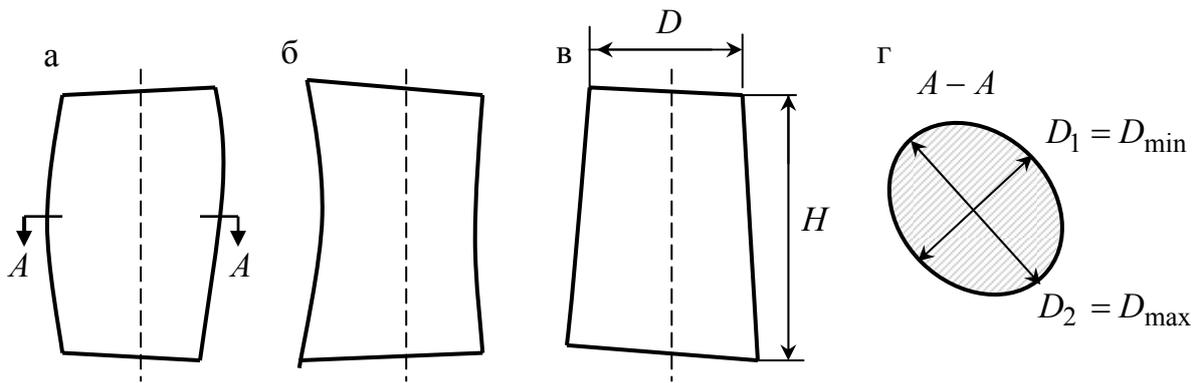


Рис. 1. Отклонения образцов по форме:
 а – бочкообразность; б – прогиб; в – конусность;
 г – эллиптичность поперечного сечения.

Для уменьшения случайной погрешности измерения диаметра D и высоты H , будем диаметр D измерять пять раз, высоту H – три раза.

Для расчета объема в формуле (1) будем использовать средние значения диаметра \bar{D} и высоты \bar{H} образца.

Поэтому окончательная расчетная формула для объема цилиндра примет вид

$$\bar{V} = \frac{\pi \bar{D}^2}{4} \bar{H}. \quad (2)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить пять раз диаметр D образца в различных сечениях по высоте и по разным образующим цилиндра (см. рис. 1).

2. Измерить три раза высоту цилиндра H по разным образующим.

Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр образца	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Значение диаметра D_i , мм					
Высота образца	H_1	H_2	H_3	–	
Значение измеренной высоты H_i , мм				–	

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 2 рассчитать средний диаметр цилиндра \bar{D} для пяти измерений

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{1}{5} (D_1 + \dots + D_5). \quad (3)$$

2. Рассчитать среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения диаметра

$$S_{\bar{D}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(D_1 - \bar{D})^2 + \dots + (D_5 - \bar{D})^2}{5(5-1)}}. \quad (4)$$

3. Рассчитать доверительный интервал случайной погрешности (случайную погрешность) измерения диаметра D для надежности $\alpha = 0,95$

$$\Delta_{\bar{D}} = t_{\alpha n} S_{\bar{D}}, \quad (5)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента; для пяти измерений $t_{\alpha n} = 2,78$ (см. метод. указ. [1]).

4. Рассчитать полную абсолютную погрешность измерения диаметра

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{\bar{D}}^2 + \left(\frac{2}{3} \Delta_{иD}\right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta_{иD}$ – инструментальная погрешность измерения диаметра.

В табл. 1 находим для штангенциркуля $\Delta_{иD} = 0,1$ мм.

5. Рассчитать относительную погрешность измерения диаметра в процентах

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta_D}{D} 100. \quad (7)$$

6. Записать результат измерения диаметра в виде (см. прил. 3)

$$\boxed{D = (\dots \pm \dots) \text{ мм}; \quad \varepsilon_D = \dots \% ; \quad \alpha = 0,95} \quad (8)$$

7. По данным табл. 2 рассчитать среднюю высоту цилиндра \bar{H} для трех измерений

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i = \frac{1}{3} (H_1 + H_2 + H_3). \quad (9)$$

8. Рассчитать СКО результата измерения высоты

$$S_{\bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(H_1 - \bar{H})^2 + (H_2 - \bar{H})^2 + (H_3 - \bar{H})^2}{3(3-1)}}. \quad (10)$$

9. Рассчитать случайную погрешность измерения высоты образца для надежности $\alpha = 0,95$

$$\Delta_{\bar{H}} = t_{\alpha n} S_{\bar{H}}, \quad (11)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента; для трех измерений $t_{\alpha n} = 4,30$ (см. метод. указ. [1]).

10. Рассчитать полную абсолютную погрешность измерения высоты

$$\Delta_H = \sqrt{\Delta_{\bar{H}}^2 + \left(\frac{2}{3} \Delta_{иH}\right)^2}, \quad (12)$$

где $\Delta_{иH}$ – инструментальная погрешность измерения высоты образца.

В табл. 1 находим для штангенциркуля $\Delta_{иH} = 0,1$ мм.

11. Рассчитать относительную погрешность измерения высоты в процентах

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta_H}{H} 100. \quad (13)$$

12. Записать результат измерения высоты в виде (см. прил. 3)

$$\boxed{H = (\dots \pm \dots) \text{ мм}; \quad \varepsilon_H = \dots\%; \quad \alpha = 0,95} \quad (14)$$

13. Рассчитать объем цилиндра образца по формуле (2).

Объем цилиндра определяется путем косвенных измерений по формуле (2), в которую входят прямо измеряемые величины D и H . Формула (2) представляет собой одночлен, поэтому в соответствии

с рекомендациями методических указаний [1] целесообразно вначале вычислить относительную погрешность измерения в процентах

$$\varepsilon_V = \sqrt{(2\varepsilon_D)^2 + \varepsilon_H^2}. \quad (15)$$

Для этого в формулу (15) все относительные погрешности следует подставить в процентах, а затем рассчитать абсолютную погрешность

$$\Delta_V = \frac{\varepsilon_V \bar{V}}{100}. \quad (16)$$

14. Записать результат измерения объема в виде (см. прил. 3)

$$V = (\dots \pm \dots) \text{ м}^3; \quad \varepsilon_V = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$$

Результатом работы являются:

1. Диаметр цилиндра с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
2. Высоту цилиндра с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
3. Объем цилиндра с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1 и 2.
2. Подробный расчет погрешностей измерения диаметра и высоты цилиндра.
3. Расчет объема цилиндра с подробным расчетом погрешностей измерения.
4. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о прямых и косвенных измерениях. Погрешность измерения. Абсолютная и относительная погрешности. Случайные и систематические погрешности.

Литература: [1, п. 1].

2. Инструментальная погрешность и ее учет при оценке погрешности результата измерения.

Литература: [1, п. 2].

3. Последовательность обработки результатов измерений при прямых многократных измерениях.

Литература: [1, п. 3].

4. Последовательность обработки результатов измерений при косвенных измерениях.

Литература: [1, п. 4].

5. Правила округления погрешности и измеряемой величины.

Литература: [1, п. 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ КАРЕТКИ С ШАЙБАМИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерить время опускания каретки с шайбами с разных высот.
2. Рассчитать ускорение каретки с шайбами путем обработки графика зависимости $h = f(t^2/2)$.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

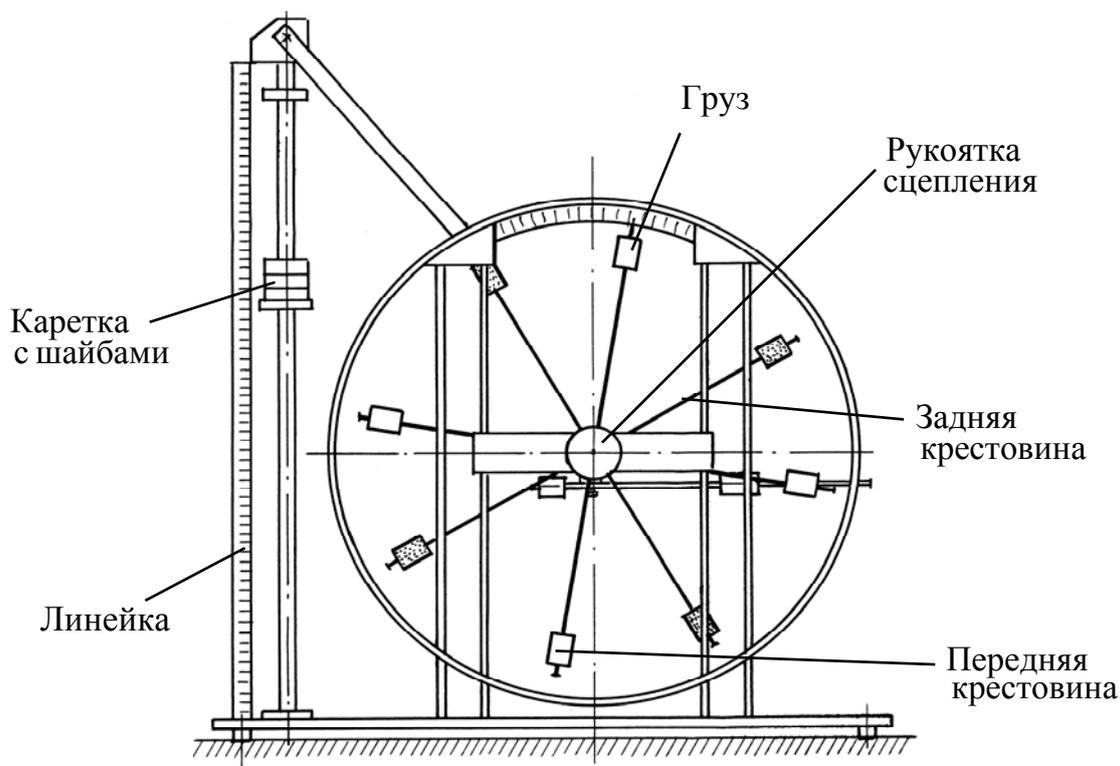


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются передняя и задняя крестовины, каретка с шайбами (см. описание стенда).

Высота подъема каретки измеряется линейкой, время – механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах крестовин на заданном расстоянии от ступицы (заданная риска должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку каждой крестовины в отдельности (см. с. 5).
4. Нить прочно прикрепить к ступице.
5. На каретку положить заданное количество шайб.
6. Повернуть рукоятку сцепления по часовой стрелке до упора, сцепив обе крестовины.

Выполнение измерений

Каждая бригада студентов получает индивидуальный вариант задания. Номер варианта задания следует указать на титульном листе отчета.

Исходные данные для выполнения работы указаны в табл. 2.

Таблица 2

Вариант задания	Положение груза на спице (номер риски)	Количество шайб на каретке
1	7	3
2	6	3
3	5	2
4	4	2
5	3	1

Работа состоит из двух частей.

Часть 1. Измерить время опускания каретки с шайбами с разных высот.

Для этого провести следующие операции.

1. По линейке измерить нижний уровень, до которого опускается каретка H_0 (отсчет вести по нижней поверхности каретки). Измеренное значение H_0 записать в табл. 3.

2. Вращая крестовины, намотать нить на ступицу так, чтобы каретка оказалась на высоте $H = 0,7$ м. Удерживать крестовины в этом положении рукой.

3. Отпустить крестовины и одновременно включить секундомер. Измерить время t движения каретки до нижнего уровня H_0 . Измеренные значения занести в табл. 3.

Таблица 3

Определяемые величины	Начальная высота каретки H , м						
	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
$h = H - H_0$, м							
t , с							
$\frac{t^2}{2}$, с ²							
$H_0 = \dots$ м							

4. Повторить измерения для других значений высоты H , указанных в таблице.

Часть 2. Провести многократные измерения времени. Для этого измерить пять раз время t опускания каретки с высоты $H = 0,5$ м. Измеренные значения занести в табл. 4.

Таблица 4

Время	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
Значение времени t_i , с					
Начальная высота каретки $H = 0,5$ м					

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Обработка результатов измерений

Обработка данных табл. 3.

1. Провести расчеты и заполнить вторую и четвертую строки табл. 3.

2. Используя вторую и четвертую строки табл. 3, построить график зависимости $h = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$ и определить по нему ускорение. При построении графика соблюдать рекомендации, изложенные в прил. 2 и в методических указаниях [3]. Обратит внимание на то, что график проходит через ноль и представляет прямую линию. На рис. 2 показан примерный вид исследуемой зависимости.

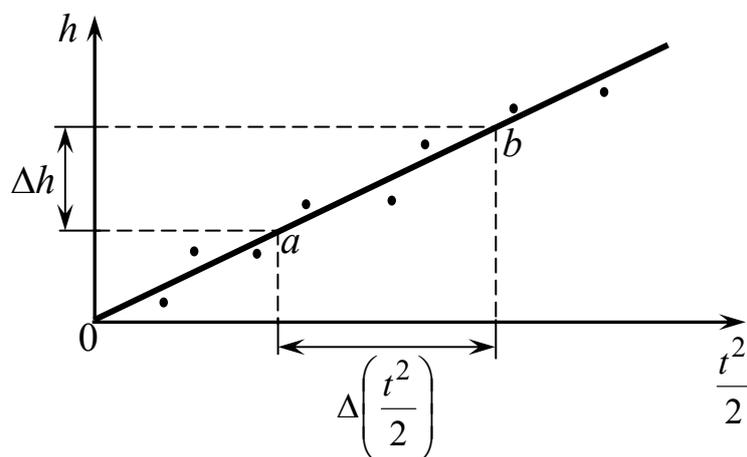


Рис. 2. Зависимость высоты от квадрата времени

Ускорение по графику находится следующим образом:

$$a_{\text{граф}} = \frac{\Delta h}{\Delta \left(\frac{t^2}{2} \right)} = \frac{h_b - h_a}{\left(\frac{t^2}{2} \right)_b - \left(\frac{t^2}{2} \right)_a}.$$

Точки a и b на графике выбираются произвольно, но достаточно далеко друг от друга, чтобы уменьшить относительную погрешность величин Δh и $\Delta \left(\frac{t^2}{2} \right)$ (см. прил. 2, метод. указ. [3]).

Обработка данных табл. 4.

1. Найти среднее значение времени \bar{t} для пяти измерений и рассчитать погрешность по методике обработки прямых многократных измерений, изложенной в методических указаниях [3].

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{5} (t_1 + \dots + t_5); \quad (1)$$

$$S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(t_1 - \bar{t})^2 + \dots + (t_5 - \bar{t})^2}{5(5-1)}}; \quad (2)$$

$$\Delta_{\bar{t}} = t_{\alpha n} S_{\bar{t}}, \text{ где } t_{\alpha n} = 2,78 \text{ для } n = 5; \quad (3)$$

$$\Delta_t = \sqrt{\Delta_{\bar{t}}^2 + \left(\frac{2}{3} \Delta_{\text{ит}} \right)^2}, \text{ где } \Delta_{\text{ит}} = 0,2 \text{ с}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta_t}{\bar{t}} 100 \%; \quad (5)$$

Записать результат измерения времени в виде (см. прил. 3)

$$t = (\dots \pm \dots) \text{ с}; \quad \varepsilon_t = \dots \%; \quad \alpha = 0,95 \quad (6)$$

2. Рассчитать среднее ускорение каретки при движении с высоты $H = 0,5$ м

$$\bar{a} = \frac{2h}{\bar{t}^2}. \quad (7)$$

3. Рассчитать относительную погрешность высоты h . Из табл. 1 находим абсолютную инструментальную погрешность измерения высоты по линейке

$$\Delta_{иH} = \Delta_{иH_0} = 1 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta_h}{h} = \frac{2/3\Delta_{иh}}{h} = \frac{2\Delta_{иh}}{3(H - H_0)};$$

$$\Delta_{иh} = \sqrt{\Delta_{иH}^2 + \Delta_{иH_0}^2} = 1,4\Delta_{иH};$$

Относительная погрешность измерения высоты h , выраженная в процентах

$$\varepsilon_h = \frac{2\Delta_{иh}}{3(H - H_0)} 100. \quad (8)$$

4. Рассчитать относительную погрешность ускорения в процентах

$$\varepsilon_a = \sqrt{(2\varepsilon_t)^2 + \varepsilon_h^2}. \quad (9)$$

Для этого в формулу (9) все относительные погрешности следует подставить в процентах; ε_t взять из выражения (6).

5. Рассчитать абсолютную погрешность ускорения

$$\Delta_a = \frac{\varepsilon_a \bar{a}}{100}, \quad (10)$$

где относительная погрешность ε_a рассчитана по формуле (9) и выражена в процентах.

6. Записать результат измерения ускорения в виде (см. прил. 3)

$$a = (\dots \pm \dots) \text{ м/с}^2; \quad \varepsilon_a = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$$

Результатом работы являются:

1. График функции $h = f(t^2/2)$ на миллиметровой бумаге с построением точек a и b .
2. Значение ускорения $a_{\text{граф}}$.

3. Значение среднего времени с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

4. Значение среднего ускорения с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 3, 4.
2. График функции $h = f(t^2/2)$ на миллиметровой бумаге с построением точек a и b и расчетом $a_{\text{граф}}$.
3. Расчет среднего времени и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам многократных измерений.
4. Расчет среднего ускорения и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам косвенных измерений.
5. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Путь, траектория, перемещение.
Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 1].
2. Мгновенное и среднее значение скорости, ускорения.
Литература: [1, п. 1.4]; [2, § 2, 3].
3. Ускорение при криволинейном движении, его составляющие \vec{a}_τ и \vec{a}_n . Что характеризует тангенциальное ускорение? Что характеризует нормальное ускорение?
Литература: [1, п. 1.5]; [2, § 3].
4. Покажите направление вектора ускорения и его составляющих при движении тела, брошенного под углом к горизонту, в трех точках: на подъеме, на спуске, в верхней точке траектории.

5. Проведите аналогию между величинами, характеризующими поступательное и вращательное движение материальной точки. Покажите связь между угловыми и линейными характеристиками движения материальной точки.

Литература: [1, п. 1.6]; [2, § 4].

6. Приведите графики $x(t)$ и $v_x(t)$ равномерного и равноускоренного прямолинейного движения.

Литература: [1, п. 1.8]; [2, § 3, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КРЕСТОВИНЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерить время, за которое крестовины совершают разное число оборотов.

2. Рассчитать угловое ускорение крестовин путем обработки графика зависимости $\varphi = f(t^2/2)$.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

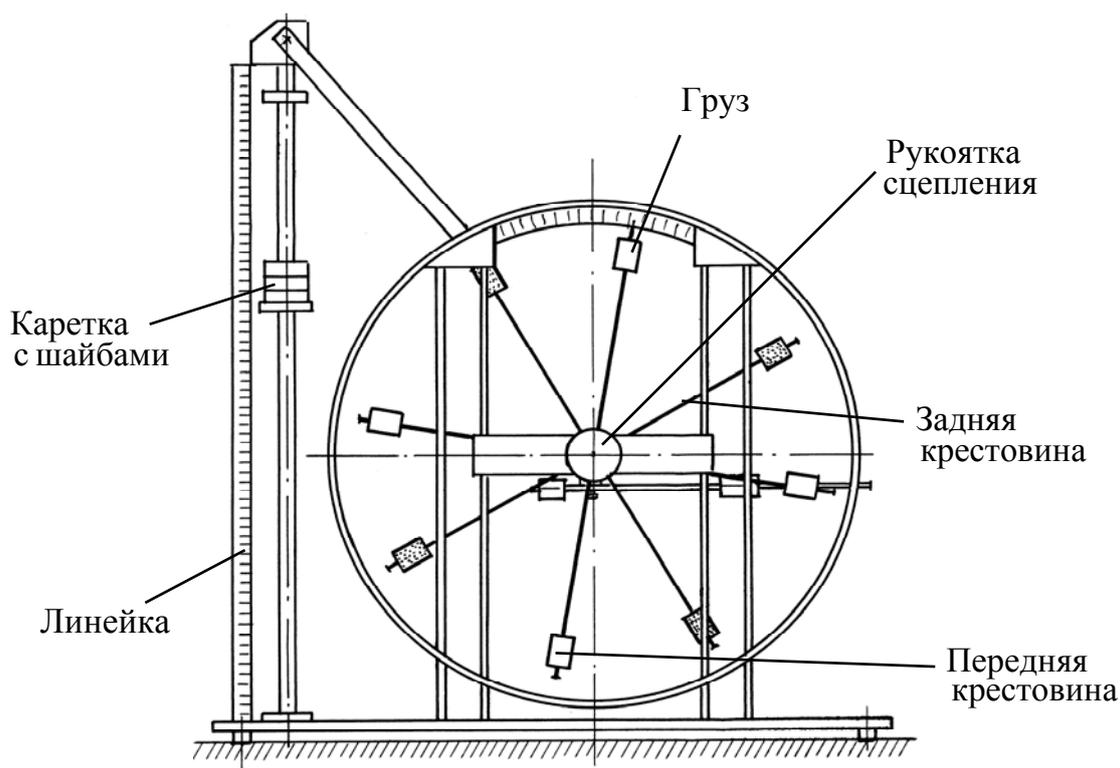


Рис. 1. Универсальный стенд

В лабораторной работе используются передняя и задняя крестовины, каретка с шайбами.

Высота подъема каретки измеряется линейкой, время – механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах крестовин на заданном расстоянии от оси вращения (заданная риска должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку каждой крестовины в отдельности (см. с. 5).
4. Нить прочно прикрепить к ступице.
5. На каретку положить заданное количество шайб.
6. Повернуть рукоятку сцепления по часовой стрелке до упора, сцепив обе крестовины.

Выполнение измерений

Каждая бригада студентов получает индивидуальный вариант задания. Номер варианта задания следует указать на титульном листе отчета.

Исходные данные для выполнения работы указаны в табл. 2.

Таблица 2

Вариант задания	Положение груза на спице (номер риски)	Количество шайб на каретке
1	7	1
2	7	2
3	7	3
4	6	2
5	6	3

Работа состоит из двух частей.

Часть 1. Измерить время, за которое крестовины совершают разное число оборотов. Для этого провести следующие операции.

1. Вращая крестовины, поднять каретку на высоту $H = 0,7$ м. Удерживать крестовины рукой в этом положении.

2. Отпустить крестовины и одновременно включить секундомер. Измерить время t одного оборота крестовин. Данные занести в табл. 3.

Таблица 3

Определяемые величины	Число оборотов крестовины, N						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
t , с							
$\frac{t^2}{2}$, с ²							
$\varphi = 2\pi N$, рад							

3. Повторить измерения для другого числа оборотов N , указанного в табл. 3.

Часть 2. Провести многократные измерения времени. Для этого измерить пять раз время t трех оборотов крестовины. Измеренные значения занести в табл. 4.

Таблица 4

Время	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
Значение времени t_i , с					
Число оборотов $N=3$ об.;	$\varphi = 2\pi N = 6\pi$ рад = 18,85 рад				

Внимания! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Обработка результатов измерений

Обработка данных табл. 3.

1. Провести расчеты и заполнить третью и четвертую строки табл. 3.

2. Используя третью и четвертую строки табл. 3, построить график зависимости $\varphi = f(t^2/2)$.

При построении графика соблюдайте рекомендации, изложенные в прил. 2 и методических указаниях [3]. Обратите внимание на то, что график проходит через ноль и представляет прямую линию. На рис. 2 показан примерный вид исследуемой зависимости.

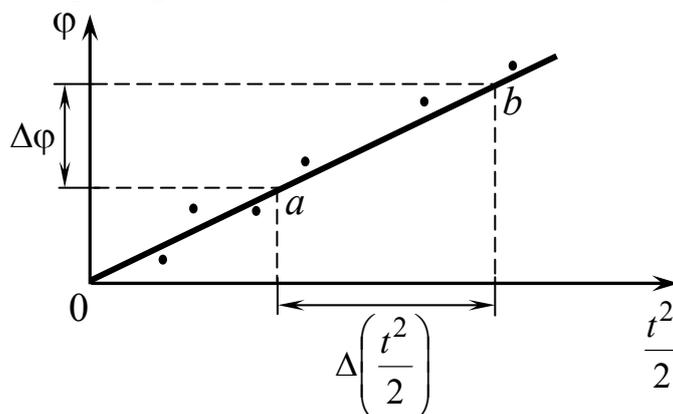


Рис. 2. Зависимость угла поворота от квадрата времени

Угловое ускорение по графику находится следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{граф}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\left(\frac{t^2}{2}\right)} = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{\left(\frac{t^2}{2}\right)_b - \left(\frac{t^2}{2}\right)_a}.$$

Точки a и b на графике выбираются произвольно, но достаточно далеко друг от друга, чтобы уменьшить относительную погрешность величин $\Delta\varphi$ и $\Delta(t^2/2)$ (см. прил. 2 и метод. указ. [3]).

Обработка данных табл. 4.

1. Найти среднее значение времени \bar{t} для пяти измерений и рассчитать погрешность по методике обработки прямых многократных измерений, изложенной в методических указаниях [3]

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{5} (t_1 + \dots + t_5); \quad (1)$$

$$S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(t_1 - \bar{t})^2 + \dots + (t_5 - \bar{t})^2}{5(5-1)}}; \quad (2)$$

$$\Delta_{\bar{t}} = t_{\alpha n} S_{\bar{t}}, \text{ где } t_{\alpha n} = 2,78 \text{ для } n = 5 \text{ [3]}; \quad (3)$$

$$\Delta_t = \sqrt{\Delta_{\bar{t}}^2 + \left(\frac{2}{3} \Delta_{ит}\right)^2}, \text{ где } \Delta_{ит} = 0,2 \text{ с}; \quad (4)$$

Рассчитать относительную погрешность времени в процентах

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta_t}{\bar{t}} 100. \quad (5)$$

Записать результат измерения времени в виде (см. прил. 3)

$$t = (\dots \pm \dots) \text{ с}; \quad \varepsilon_t = \dots \%; \quad \alpha = 0,95 \quad (6)$$

2. Рассчитать относительную погрешность угла поворота крестовины в процентах

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\Delta_{\varphi}}{\varphi} 100, \quad (7)$$

где Δ_{φ} – абсолютная погрешность измерения угла поворота.

Эта погрешность зависит в основном от скорости вращения крестовины и реакции экспериментатора. Будем считать ее в данной работе равной $\Delta_{\varphi} = \pm \frac{1}{16}$ об = $\pm 0,39$ рад. Тогда относительная погрешность измерения угла поворота, выраженная в процентах, будет равна

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\Delta_{\varphi}}{\varphi} = \frac{0,39}{18,85} 100 = 2,1 \%. \quad (8)$$

3. Рассчитать среднее значение углового ускорения и найти относительную погрешность измерения ускорения в процентах по методике обработки результатов косвенных измерений для трех оборотов крестовины

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2\varphi}{\bar{t}^2}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\varepsilon} = \sqrt{(2\varepsilon_t)^2 + \varepsilon_{\varphi}^2}; \quad (10)$$

В формулу (10) следует подставить относительные погрешности в процентах, значение ε_t взять из выражения (5), а ε_{φ} – из формулы (8).

Рассчитать абсолютную погрешность измерения углового ускорения

$$\Delta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon} \bar{\varepsilon}}{100}. \quad (11)$$

Записать результат измерения углового ускорения в виде (см. прил. 3)

$\varepsilon = (\dots \pm \dots) \text{ рад/с}^2; \quad \varepsilon_{\varepsilon} = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$

Результатом работы являются:

1. График функции $\varphi = f(t^2/2)$ на миллиметровой бумаге с построением точек a и b .
2. Значение ускорения $\varepsilon_{\text{граф}}$.
3. Значение среднего времени с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
4. Значение среднего ускорения с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 3, 4.
2. График функции $\varphi = f(t^2/2)$ на миллиметровой бумаге с построением точек a и b и расчетом $\varepsilon_{\text{граф}}$.

3. Расчет среднего времени и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам многократных измерений.

4. Расчет среднего ускорения и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам косвенных измерений.

5. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Путь, траектория, перемещение.

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 1].

2. Мгновенное и среднее значение скорости, ускорения.

Литература: [1, п. 1.4]; [2, § 2, 3].

3. Ускорение при криволинейном движении, его составляющие \vec{a}_τ и \vec{a}_n . Что характеризует тангенциальное ускорение? Что характеризует нормальное ускорение?

Литература: [1, п. 1.5]; [2, § 3].

4. Покажите направление вектора ускорения и его составляющих при движении тела, брошенного под углом к горизонту, в трех точках: на подъеме, на спуске, в верхней точке траектории.

5. Угловое перемещение, угловая скорость и ускорение. Частота, циклическая частота и период вращения. Связь между линейными и угловыми характеристиками движения.

Литература: [1, п. 1.6]; [2, § 4].

6. Приведите графики $\varphi(t)$ и $\omega(t)$ равномерного и равноускоренного вращательного движения.

Литература: [1, п. 1.8]; [2, § 3, 4].

7. Правила построения графиков.

Литература: [3]; прил. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.
2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ ПАРЫ «СТУПИЦА – ТОРМОЗНАЯ КОЛОДКА»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить коэффициенты трения покоя и скольжения пары «ступица – тормозная колодка».

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

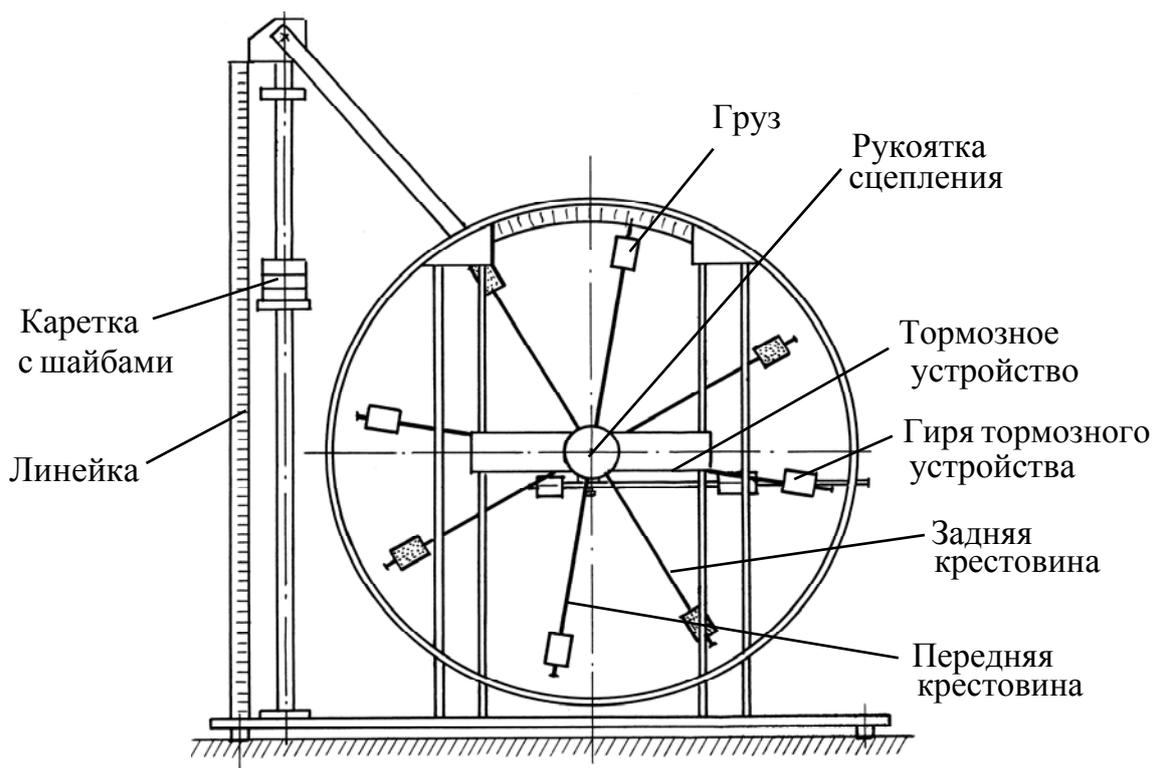


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются передняя и задняя крестовины, тормозное устройство и каретка с шайбами (см. описание стенда).

Высота подъема каретки и положение гири тормозного устройства на длинном плече рычага измеряются линейкой, время – механическим секундомером. Положение гири тормозного устройства определяется по шкале на длинном плече рычага. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с
Шкала длинного плеча рычага	180 мм	20 мм/дел.	–	1 мм

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах крестовин на заданном расстоянии от оси вращения (заданная риска на спице должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку каждой крестовины в отдельности (см. с. 5).
4. Нить прочно прикрепить к ступице.
5. Вращением рукоятки сцепления по часовой стрелке сцепить обе крестовины.

Выполнение измерений

Каждая бригада получает индивидуальный вариант задания. Номер варианта задания следует указать на титульном листе отчета.

Исходные данные для выполнения работы указаны в табл. 2.

Таблица 2

Вариант задания	Положение груза на спице (номер риски)
1	7
2	6
3	5
4	4
5	3

Работа состоит из двух частей.

⁵ **Часть 1.** Измерить коэффициент сухого трения покоя пары «ступица – тормозная колодка».

Для этого следует выполнить следующие операции.

1. Настроить тормозное устройство (см. с. 7).

2. Переместить гирю тормозного устройства в крайнее правое положение ($x = 180$ мм).

3. Снять с каретки все шайбы и закрепить их стопорными винтами в верхней части трубчатой направляющей.

4. Вращая крестовины, намотать нить на ступицу, подняв пустую каретку на высоту $H = 0,7$ м (высота подъема каретки отсчитывается по линейке на уровне нижней плоскости основания каретки).

5. Установить на каретку последовательно такое количество шайб, при котором начнется вращение крестовины. Затем снять с каретки одну шайбу, чтобы крестовина самопроизвольно не начинала вращаться при заданном моменте трения. Записать в табл. 3 количество шайб k , оставшихся на каретке.

6. Провести прямые многократные измерения плеча x тормозного устройства, при котором начинается вращение крестовин. Для этого, плавно перемещая гирю влево, определить плечо x , при котором крестовины начнут вращаться. Значение плеча x измерить линейкой с ценой деления 1 мм/дел и записать в табл. 3. Отсчет величины x ведется по левой кромке гири. Опыт повторить три раза.

Таблица 3

Определяемые величины	Плечо тормозного устройства, x		
	x_1	x_2	x_3
Значение плеча x , мм			
Количество шайб на каретке	$k = \dots$		
Масса каретки с шайбами	$m = m_{\text{к}} + km_{\text{ш}} = \dots$		

Часть 2. Измерить коэффициент сухого трения скольжения пары «ступица – колодка».

Для этого нужно провести следующие операции.

1. Переместить гирию тормозного устройства в крайнее левое положение ($x = 0$).

2. Записать в табл. 4 нижний уровень опускания каретки H_0 .

3. Вращая крестовину, намотать нить на ступицу и поднять каретку с шайбами на высоту $H = 0,7$ м; удерживать крестовину рукой.

4. Отпустить крестовину и одновременно включить секундомер. Измерить время t перемещения каретки до нижнего уровня H_0 . Результат измерения занести в табл. 4.

Таблица 4

Определяемые величины	Положение гири тормозного устройства x , мм							
	0	20	40	60	80	100	120	140
t , с								
N , Н								
a , м/с ²								
$H_0 = \dots$ м;	$h = H - H_0 = 0,7 - H_0 = \dots$ м							

5. Повторить опыт для значений x , указанных в табл. 4. Все опыты проводить при одном и том же значении H . Опыты закончить, когда вращение крестовины не будет возникать.

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Сила нормального давления колодки на ступицу рассчитывается по формуле

$$N = \frac{x}{b} m_{\Gamma} g, \quad (1)$$

где x – плечо гири; m_{Γ} – масса гири; g – ускорение свободного падения; b – плечо силы N .

Считая движение каретки равноускоренным, можно вычислить ускорение по формуле

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

(в условиях опыта $h = H - H_0$).

Уравнение движения каретки с шайбами записывается следующим образом

$$mg - F_{\text{тр}} = (m + m_{\text{эф}})a, \quad (3)$$

где m – масса каретки с шайбами; $F_{\text{тр}}$ – сила трения скольжения пары «ступица – тормозная колодка»; $m_{\text{эф}}$ – эффективная масса, характеризующая в опыте инерционные свойства вращающихся крестовин и зависящая от положения грузов на спицах.

Сила трения скольжения связана с нормальной составляющей силы реакции опоры известной зависимостью

$$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{ск}}N. \quad (4)$$

С учетом формулы (4) уравнение (3) переписывается следующим образом

$$mg - \mu_{\text{ск}}N = (m + m_{\text{эф}})a. \quad (5)$$

Когда каретка перестанет двигаться ($V = 0$ и $a = 0$), это означает, что сила тяжести каретки с шайбами и сила трения $F_{\text{тр}}$ в системе уравновешены $N(a = 0) = N_0$ или $mg = \mu_{\text{ск}}N_0$.

Отсюда коэффициент трения скольжения

$$\mu_{\text{ск}} = \frac{mg}{N_0}. \quad (6)$$

Для нахождения коэффициента трения покоя нужно иначе проводить эксперимент, т. е. определять силу трения при начале движения тела из состояния покоя. Тогда коэффициент трения покоя будет равен:

$$\mu_{\text{пок}} = \frac{mg}{N_{\text{пок}}}. \quad (7)$$

Сила нормального давления $N_{\text{пок}}$, при которой начинается движение крестовины, получается из формулы (1)

$$N_{\text{пок}} = \frac{\bar{x}}{b} m_{\Gamma} g, \quad (8)$$

где \bar{x} – среднее значение плеча гири тормозного устройства, при котором начинается движение крестовины.

Подставляя выражение (8) в (7), получаем расчетную формулу для среднего значения коэффициента трения покоя:

$$\bar{\mu}_{\text{пок}} = \frac{mb}{\bar{x}m_{\Gamma}}. \quad (9)$$

Обработка результатов измерений

Часть 1. Рассчитать коэффициент трения покоя и найти его погрешность по методике обработки результатов косвенных измерений, изложенной в методических указаниях [3].

Для этого следует провести следующие операции.

1. По данным табл. 3 найти среднее значение плеча \bar{x} тормозного устройства, при котором начинается вращение крестовин, и рассчитать погрешность величины x по методике обработки прямых многократных измерений, изложенной в методических указаниях [3].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3); \quad (10)$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{3(3-1)}}; \quad (11)$$

$$\Delta_{\bar{x}} = t_{\alpha n} S_{\bar{x}}, \quad \text{где } t_{\alpha n} = 4,30 \text{ для } n = 3 \text{ [3]}; \quad (12)$$

$$\Delta_x = \sqrt{\Delta_{\bar{x}}^2 + \left(\frac{2}{3}\Delta_{\text{их}}\right)^2}, \quad \text{где } \Delta_{\text{их}} = 1,0 \text{ мм.} \quad (13)$$

Рассчитать относительную погрешность плеча в процентах

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} 100. \quad (14)$$

Записать результат измерения плеча в виде (см. прил. 3)

$$x = (\dots \pm \dots) \text{ мм}; \quad \varepsilon_x = \dots \%; \quad \alpha = 0,95$$

2. Рассчитать коэффициент трения покоя по формуле (9).

Входящую в формулу (9) массу каретки с шайбами рассчитать по формуле

$$m = m_k + k m_{ш}, \quad (15)$$

где m_k , $m_{ш}$ – масса каретки, шайбы; k – количество шайб на каретке, при котором проводилось измерение длины плеча x тормозного устройства;

масса каретки $m_k = (47 \pm 1,0) \text{ г}$; ($m_k = 47,0 \text{ г}$; $\Delta_{им_k} = 1,0 \text{ г}$);

масса шайбы $m_{ш} = (220 \pm 1,0) \text{ г}$; ($m_{ш} = 220,0 \text{ г}$; $\Delta_{им_{ш}} = 1,0 \text{ г}$);

масса груза тормозного устройства $m_{Г} = (140,0 \pm 1,0) \text{ г}$; ($m_{Г} = 140,0 \text{ г}$; $\Delta_{им_{Г}} = 1,0 \text{ г}$);

– \bar{x} – среднее значение плеча тормозного устройства, взять из формулы (10);

– плечо силы нормального давления $b = (20,0 \pm 0,5) \text{ мм}$; ($b = 20,0 \text{ мм}$; $\Delta_{ib} = 0,5 \text{ мм}$).

Формула (9) представляет собой одночлен, поэтому в соответствии с рекомендациями методических указаний [3] сначала вычислим в процентах относительную погрешность

$$\varepsilon_{\mu_{\text{пок}}} = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_b^2 + \varepsilon_{m_{Г}}^2 + \varepsilon_x^2}. \quad (16)$$

Входящие в формулу (16) относительные погрешности также следует вычислить в процентах.

При расчете погрешности измерения массы каретки с шайбами выражение (15) следует записать более подробно:

$$m = m_k + m_{ш1} + m_{ш2} + \dots + m_{шk}.$$

Результаты измерения масс отдельных шайб являются независимыми, поэтому абсолютные погрешности шайб

$\Delta_{m_{ш1}}, \Delta_{m_{ш2}}, \dots, \Delta_{m_{шk}}$, в общем случае будут разными (в том числе и по знаку), но попадающие в один доверительный интервал $\Delta_{m_{ш}}$.

Следовательно, относительная погрешность измерения массы каретки с шайбами будет равна:

$$\varepsilon_m = \frac{2 \sqrt{\Delta_{m_k}^2 + \Delta_{m_{ш1}}^2 + \Delta_{m_{ш2}}^2 + \dots + \Delta_{m_{шk}}^2}}{3 (m_k + m_{ш1} + m_{ш2} + \dots + m_{шk})} \approx \frac{2 \sqrt{\Delta_{m_k}^2 + k(\Delta_{m_{ш}})^2}}{3 (m_k + k m_{ш})} \quad (17)$$

Относительная погрешность плеча тормозного устройства

$$\varepsilon_b = \frac{2 \Delta_{ib}}{3 b} 100. \quad (18)$$

Относительная погрешность массы груза

$$\varepsilon_{m_\Gamma} = \frac{2 \Delta_{m_\Gamma}}{3 m_\Gamma} 100. \quad (19)$$

Относительную погрешность плеча ε_x – взять из формулы (14).

Рассчитать в процентах относительную погрешность коэффициента трения покоя по формуле (16).

Абсолютная погрешность коэффициента трения покоя

$$\Delta_{\mu_{\text{пок}}} = \frac{\varepsilon_{\mu_{\text{пок}}} \bar{\mu}_{\text{пок}}}{100}. \quad (20)$$

Записать результат измерения коэффициента трения покоя в виде (см. прил. 3)

$$\mu_{\text{пок}} = (\dots \pm \dots); \quad \varepsilon_{\mu_{\text{пок}}} = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$$

Часть 2. Определить коэффициент трения скольжения пары «ступица – тормозная колодка».

Для этого провести следующие операции.

1. Заполнить табл. 4, рассчитав силу нормального давления N по формуле (1) и ускорение a по формуле (2).

2. По данным табл. 4 построить график зависимости $N = f(a)$. При построении графика соблюдать рекомендации, изложенные в прил. 2. Продолжить полученную прямую до пересечения с осью ор-

динат и определить по графику силу нормального давления N_0 , соответствующую $a = 0$ (см. рис. 2).

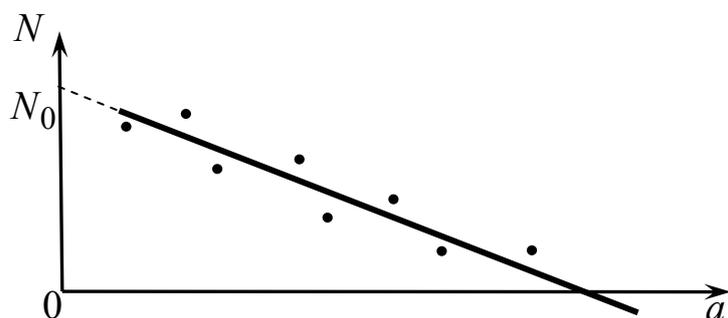


Рис. 2. Зависимость силы нормального давления от ускорения

3. Вычислить коэффициент трения скольжения по формуле (6).

Результатом работы являются:

1. Результат измерения коэффициента трения покоя с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
2. График функции $N = f(a)$ на миллиметровой бумаге.
3. Значение силы нормального давления N_0 , полученное с помощью графика.
4. Значение коэффициента трения скольжения $\mu_{\text{СК}}$, полученное из графика $N = f(a)$.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 3, 4.
2. Расчет коэффициента трения покоя и подробный расчет погрешностей измерения по результатам многократных косвенных измерений.
3. График функции $N = f(a)$ на миллиметровой бумаге.
4. Значение силы нормального давления N_0 , полученное с помощью графика.
5. Расчет коэффициента трения скольжения.
6. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Законы динамики.

Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 5 – 7].

2. Фундаментальные взаимодействия (силы), силы механики и их природа. Принцип суперпозиции для сил. Закон всемирного тяготения, сила тяжести, вес тела и реакция опоры.

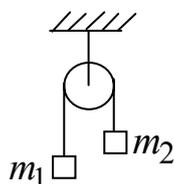
Литература: [1, п. 2.3]; [2, § 8].

3. Консервативные и неконсервативные силы.

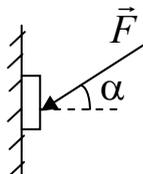
Литература: [1, п. 3.4]; [2, § 12].

4. При движении точки по окружности угловая скорость изменяется по закону $\omega \sim t^4$. Как изменяется со временем касательная сила, действующая на точку?

5. Выведите выражение для сил натяжения нити в машине Атвуда.

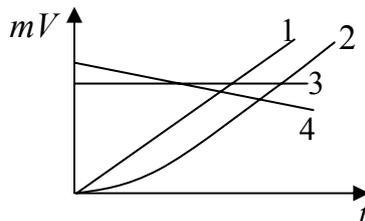


6. Тело массой m прижимается к вертикальной стенке силой \vec{F} , как показано на рисунке. Каким должен быть коэффициент трения между телом и стенкой, чтобы тело не двигалось?



7. На чертеже изображены кривые зависимости импульса тела от времени действия силы. Какая кривая соответствует действию постоянной силы, совпадающей по направлению с импульсом тела? Ка-

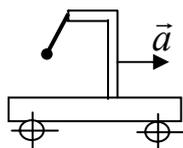
кая кривая соответствует случаю, когда сумма сил, действующих на тело, равна нулю?



8. Какую работу совершает сила тяжести при перемещении тела по горизонтальной поверхности?

9 Тело толкнули вверх вдоль наклонной плоскости с углом наклона α . Коэффициент трения скольжения между телом и плоскостью μ . Напишите выражение для ускорения тела.

10. Маятник подвешен к кронштейну, который движется в горизонтальном направлении с ускорением a . Выведите выражение для силы натяжения нити, действующей на маятник.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ КРЕСТОВИН

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить эффективную массу крестовин.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

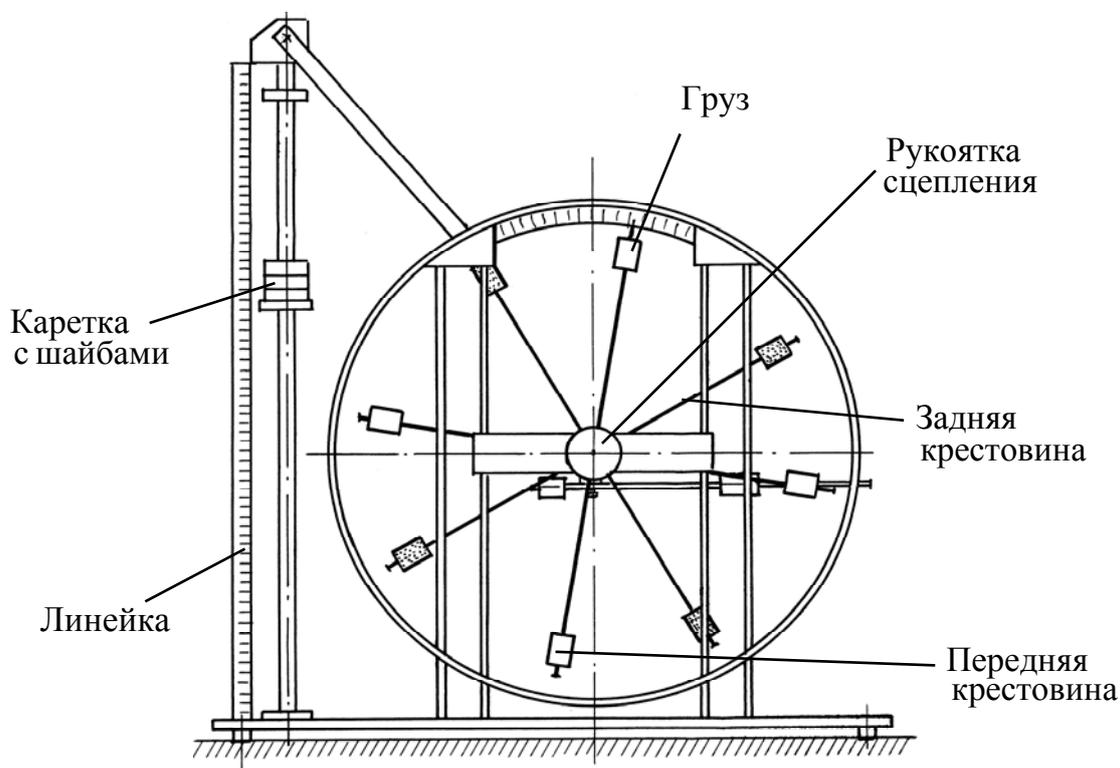


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются передняя и задняя крестовины, каретка с шайбами.

Высота подъема каретки измеряется линейкой, время – механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, Δ_i
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах передней и задней крестовины на заданном расстоянии от оси вращения (риска на спице должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку каждой из крестовин в отдельности (см. с. 5).
4. Нить закрепить к ступице прочно.
5. Вращением рукоятки сцепления по часовой стрелке сцепить обе крестовины.
6. На каретку установить четыре шайбы.

Выполнение измерений

Каждая бригада получает индивидуальный вариант задания. Номер варианта задания следует указать на титульном листе отчета. Исходные данные для выполнения работы указаны в табл. 2.

Таблица 2

Вариант задания	Положение груза на спице (номер риски)
1	7
2	6
3	5
4	4
5	3

Работа состоит из двух частей.

Часть 1. Измерить время опускания каретки с четырьмя, тремя, двумя и одной шайбой. Для этого выполнить следующие операции.

1. Измерить нижний уровень опускания каретки H_0 (отсчет по линейке вести по нижней поверхности каретки) и записать в табл. 3.

2. Вращая крестовины, поднять каретку с четырьмя шайбами на высоту $H = 0,7$ м и удерживать крестовины рукой.

3. Отпустить крестовины и одновременно включить секундомер. Измерить время t опускания каретки до нижнего уровня H_0 . Измеренное значение записать в первый столбец табл. 3.

4. Повторить опыт соответственно с тремя, двумя и одной шайбами, сохраняя все другие условия опыта неизменными. Измеренные значения занести в последующие столбцы табл. 3.

Таблица 3

Определяемые величины	Количество шайб на каретке, k			
	4	3	2	1
m , г				
mg , Н				
t_1 , с				
t_2 , с				
t_3 , с				
t_4 , с	–		–	–
t_5 , с	–		–	–
\bar{t} , с				
a , м/с ²				
Исходные данные: $H_0 = \dots$ м; $h = H - H_0 = 0,7 - H_0 = \dots$ м $m_k = 47$ г; $\Delta_{им_k} = 1,0$ г; $m_{ш} = 220$ г; $\Delta_{им_{ш}} = 1,0$ г				

Часть 2. Провести прямые многократные измерения времени опускания каретки с тремя шайбами. Для этого провести еще два опыта с тремя шайбами. Измеренные значения записать во второй столбец табл. 3 (в итоге получим пять измерений в воспроизводимых условиях опыта).

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Каретка с шайбами перемещается вдоль трубчатой направляющей под действием силы тяжести. Предполагая, что силой трения при движении каретки можно пренебречь, получаем уравнение движения каретки с шайбами

$$mg = (m + m_{\text{эф}})a, \quad (1)$$

где m – масса каретки с шайбами; $m_{\text{эф}}$ – эффективная масса, характеризующая в опыте инерционные свойства крестовин (зависит от положения грузов на спицах).

В конструкции стенда обеспечивается выполнение условия $m_{\text{эф}} \gg m$, поэтому уравнение (1) упрощается

$$mg = m_{\text{эф}}a. \quad (2)$$

Поскольку движение каретки с шайбами происходит под действием постоянной силы, то движение ее должно быть равноускоренным. Начальная скорость движения в опытах отсутствует, поэтому ускорение каретки можно вычислить по формуле

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

Обработка результатов измерений

Обработка данных табл. 3.

1. Рассчитать массу каретки с шайбами для $k=1 \dots 4$ по формуле

$$m = m_{\text{к}} + k m_{\text{ш}},$$

где $m_{\text{к}}$, $m_{\text{ш}}$ – массы каретки и шайбы, значения которых приведены в табл. 3. Результаты расчетов занести во вторую строку табл. 3.

2. Рассчитать силу тяжести mg .

3. Подсчитать среднее значение времени \bar{t} опускания каретки для каждой массы каретки с шайбами.

4. Вычислить ускорение a по формуле (3) для всех опытов.

5. Результаты всех проведенных расчетов занести в табл. 3.

6. По результатам опытов построить график зависимости $a = f(mg)$, который согласно уравнению (2) должен иметь вид прямой (рис. 2).

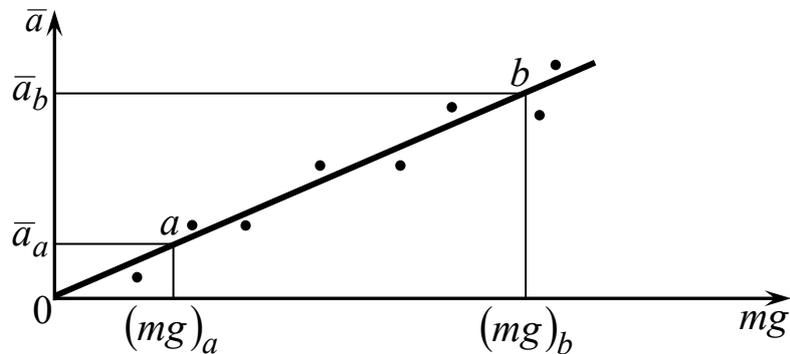


Рис. 2. Зависимость ускорения от силы тяжести

7. На графике выбрать произвольно две точки a и b , расположенные достаточно далеко друг от друга, и рассчитать эффективную массу крестовин по формуле

$$m_{\text{эф. граф}} = \frac{\Delta(mg)}{\Delta a} = \frac{(mg)_b - (mg)_a}{\bar{a}_b - \bar{a}_a}. \quad (4)$$

8. Найти соотношение между массой каретки с четырьмя шайбами и эффективной массой крестовин $m_{\text{эф. граф}}$.

$$\sigma = \frac{m}{m_{\text{эф. граф}}}.$$

9. Если будет получено значение $\sigma < 0,01$, то можно утверждать, что принятое ранее условие $m_{\text{эф. граф}} \gg m$ выполняется.

10. По данным второго столбца табл. 3 рассчитать среднее значение времени \bar{t} опускания каретки с тремя шайбами для пяти измерений и рассчитать погрешности Δ_t и ε_t по методике обработки прямых многократных измерений, изложенной в методических указаниях [3].

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{5} (t_1 + \dots + t_5); \quad (5)$$

$$S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(t_1 - \bar{t})^2 + \dots + (t_5 - \bar{t})^2}{5(5-1)}}; \quad (6)$$

$$\Delta_{\bar{t}} = t_{\alpha n} S_{\bar{t}}, \quad \text{где } t_{\alpha n} = 2,78 \text{ для } n = 5 \text{ (см. метод. указ. [3]);} \quad (7)$$

$$\Delta_t = \sqrt{\Delta_{\bar{t}}^2 + \left(\frac{2}{3}\Delta_{ит}\right)^2}, \quad \text{где } \Delta_{ит} = 0,2 \text{ с.} \quad (8)$$

Рассчитать относительную погрешность времени в процентах

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta_t}{\bar{t}} 100. \quad (9)$$

Результат измерения времени записать в виде (см. прил. 3)

$$t = (\dots \pm \dots) \text{ с; } \varepsilon_t = \dots \%; \quad \alpha = 0,95 \quad (10)$$

11. С помощью формул (2) и (3) вычислить среднее значение эффективной массы крестовин

$$\bar{m}_{\text{эф}} = \frac{mg\bar{t}^2}{2h}. \quad (11)$$

12. Рассчитать погрешность $m_{\text{эф}}$ по методу обработки косвенных измерений.

Выражение (11) представляет собою одночлен, и в соответствии с рекомендациями методических указаний [3], сначала следует рассчитать относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon_{m_{\text{эф}}} = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_g^2 + (2\varepsilon_t)^2 + \varepsilon_h^2}. \quad (12)$$

Входящие в формулу (12) относительные погрешности следует вычислить в процентах.

В табл. 3 масса каретки с тремя шайбами рассчитывается по формуле

$$m = m_{\text{к}} + 3m_{\text{ш}}$$

Однако при расчете погрешности измерения массы каретки с шайбами формулу следует записать более подробно:

$$m = m_{\text{к}} + m_{\text{ш1}} + m_{\text{ш2}} + m_{\text{ш3}}.$$

Результаты измерения масс отдельных шайб являются независимыми, поэтому абсолютные погрешности шайб $\Delta_{m_{\text{ш1}}}$, $\Delta_{m_{\text{ш2}}}$, $\Delta_{m_{\text{ш3}}}$ в общем случае будут разными (в том числе и по знаку), но попадающими в один доверительный интервал $\Delta_{m_{\text{ш}}}$.

Следовательно, относительная погрешность измерения массы каретки с тремя шайбами будет равна:

$$\varepsilon_m = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{\Delta_{m_{\text{к}}}^2 + \Delta_{m_{\text{ш1}}}^2 + \Delta_{m_{\text{ш2}}}^2 + \Delta_{m_{\text{ш3}}}^2}}{m_{\text{к}} + m_{\text{ш1}} + m_{\text{ш2}} + m_{\text{ш3}}} \approx \frac{2}{3} \frac{\sqrt{\Delta_{m_{\text{к}}}^2 + 3(\Delta_{m_{\text{ш}}})^2}}{m_{\text{к}} + 3m_{\text{ш}}} \quad (13)$$

Будем считать, что относительная погрешность ускорения свободного падения $\varepsilon_g \ll \varepsilon_t$ и ее можно принять $\varepsilon_g = 0$.

Погрешность времени ε_t возьмем из (9). Относительная погрешность пути $h = H - H_0$

$$\varepsilon_h = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{\Delta_H^2 + \Delta_{H_0}^2}}{h} 100. \quad (14)$$

Из табл. 1 $\Delta_H = \Delta_{H_0} = 1 \text{ мм}$.

Относительную погрешность эффективной массы в процентах рассчитать по формуле (12).

Абсолютная погрешность измерения эффективной массы

$$\Delta_{m_{\text{эф}}} = \frac{\varepsilon_{m_{\text{эф}}} \bar{m}_{\text{эф}}}{100}. \quad (15)$$

Результат измерения эффективной массы записать в следующем виде (см. прил. 3)

$$\boxed{m_{\text{эф}} = (\dots \pm \dots) \text{ кг}; \quad \varepsilon_{m_{\text{эф}}} = \dots \%; \quad \alpha = 0,95} \quad (16)$$

Результатом работы являются:

1. График функции $\bar{a} = f(mg)$ на миллиметровой бумаге с построением на нем точек a и b .

2. Значение эффективной массы $m_{\text{эф. граф}}$, полученное из графика.
3. Значение среднего времени с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
4. Значение средней эффективной массы $m_{\text{эф}}$ с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 3.
2. График функции $\bar{a} = f(mg)$ на миллиметровой бумаге с построением на нем точек a и b .
3. Расчет эффективной массы $m_{\text{эф. граф}}$, полученной из графика по формуле (4).
4. Расчет среднего значения времени и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам многократных измерений.
5. Расчет среднего значения эффективной массы крестовины и подробный расчет погрешностей измерения ускорения по результатам косвенных измерений.
6. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

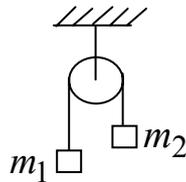
1. Законы динамики.
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 5 – 7].
2. Фундаментальные взаимодействия (силы), силы механики и их природа. Принцип суперпозиции для сил. Закон всемирного тяготения, сила тяжести, вес тела и реакция опоры.
Литература: [1, п. 2.3]; [2, § 8].

3. Консервативные и неконсервативные силы.

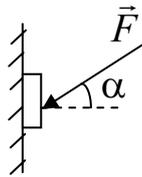
Литература: [1, п. 3.4]; [2, § 12].

4. При движении точки по окружности угловая скорость изменяется по закону $\omega \sim t^4$. Как изменяется со временем касательная сила, действующая на точку?

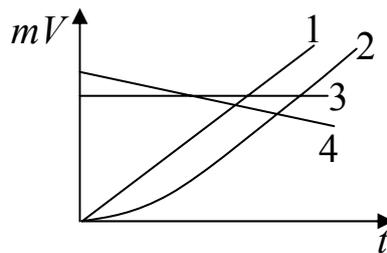
5. Выведите выражение для сил натяжения нити в машине Атвуда.



6. Тело массой m прижимается к вертикальной стенке силой \vec{F} , как показано на рисунке. Каким должен быть коэффициент трения между телом и стенкой, чтобы тело не двигалось?



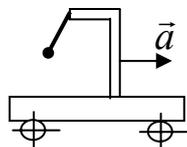
7. На чертеже изображены четыре кривые зависимости импульса тела от времени действия силы. Какая кривая соответствует действию постоянной силы, совпадающей по направлению с импульсом тела? Какая кривая соответствует случаю, когда сумма сил, действующих на тело, равна нулю?



8. Какую работу совершает сила тяжести при перемещении тела по горизонтальной плоскости?

9. Тело толкнули вверх вдоль наклонной плоскости с углом наклона α . Коэффициент трения скольжения между телом и плоскостью μ . Напишите выражение для ускорения тела.

10. Маятник подвешен к кронштейну, который движется в горизонтальном направлении с ускорением a . Выведите выражение для силы натяжения нити, действующей на маятник.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платунов Е.С. Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
4. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КРЕСТОВИНЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить момент инерции крестовины.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

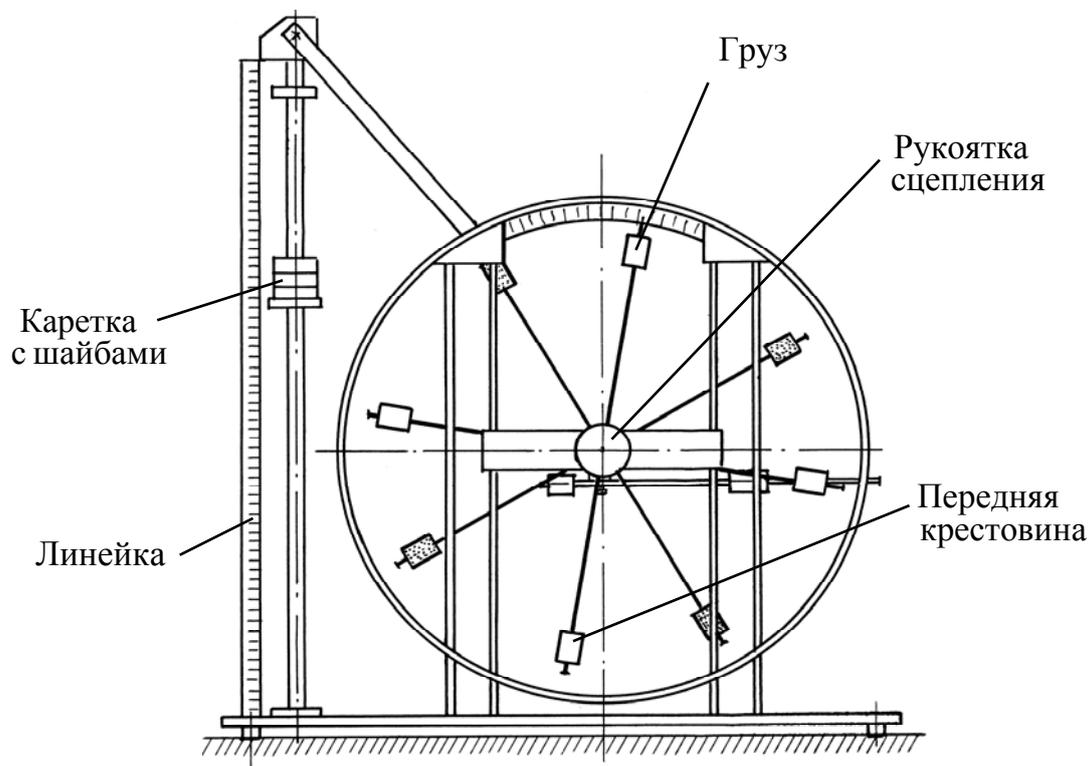


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются передняя крестовина и каретка с шайбами.

Высота подъема каретки измеряется линейкой, время – механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах передней крестовины на заданном расстоянии от оси вращения (риска на спице должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку крестовины (см. с. 5).
4. Нить прочно прикрепить к ступице.
5. На каретку установить четыре шайбы.

Выполнение измерений

Каждая бригада получает индивидуальный вариант задания. Номер варианта задания следует указать на титульном листе отчета.

Исходные данные для выполнения работы указаны в табл. 2.

Таблица 2

Вариант задания	Положение груза на спице (номер риски)
1	7
2	6
3	5
4	4
5	3

1. По линейке измерить нижний уровень каретки H_0 (отсчет провести по нижней плоскости каретки) и записать в табл. 3.

2. Вращая крестовину, намотать нить на ступицу и поднять каретку с четырьмя шайбами на высоту $H = 0,7$ м; удерживать крестовину в этом положении рукой.

3. Отпустить крестовину и одновременно включить секундомер. Измерить время t движения каретки до нижнего уровня H_0 . Опыт повторить три раза. Измеренные значения записать в табл. 3.

Таблица 3

Определяемые величины	Количество шайб на каретке, k			
	4	3	2	1
m , г				
t_1 , с				
t_2 , с				
t_3 , с				
\bar{t} , с				
ε , рад/с ²				
M_H , Н·м				
Исходные данные: $H_0 = \dots$ м; $h = H - H_0 = 0,7 - H_0 = \dots$ м $m_k = 47$ г; $\Delta_{имк} = 1,0$ г; $m_{ш} = 220$ г; $\Delta_{имш} = 1,0$ г				

4. Повторить опыт с тремя, двумя и одной шайбой. Измеренные значения занести в соответствующие столбцы табл. 3.

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Основное уравнение динамики вращательного движения в проекции на ось вращения для вращающейся крестовины записывается следующим образом:

$$M_H - M_{тр} = I\varepsilon, \quad (1)$$

где M_H – момент силы натяжения нити, вызывающей вращение; $M_{тр}$ – момент сил трения; I – момент инерции системы; ε – угловое ускорение.

Вращение крестовины вызвано поступательным движением каретки с шайбами. Это движение описывается следующим уравнением динамики:

$$mg - F_{\text{H}} = ma, \quad (2)$$

где m – масса каретки с шайбами, F_{H} – сила натяжения нити.

Сила натяжения из уравнения (2)

$$F_{\text{H}} = mg - ma. \quad (3)$$

Считая движение каретки равноускоренным, можно вычислить линейное ускорение по формуле

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

Подстановка формулы (4) в уравнение (3) дает

$$F_{\text{H}} = m \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (5)$$

Момент силы натяжения по определению

$$M_{\text{H}} = F_{\text{H}} r, \quad (6)$$

где r – радиус ступицы (плечо силы F_{H}).

Выражая радиус ступицы через ее диаметр $r = \frac{d}{2}$, и учитывая формулу (5), получаем

$$M_{\text{H}} = \frac{m d}{2} \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (7)$$

При отсутствии проскальзывания нити угловое ускорение ε , с которым вращается система, связано с линейным ускорением a через радиус r ступицы

$$a = \varepsilon r = \varepsilon \frac{d}{2}, \quad (8)$$

где d – диаметр ступицы, $d = 46,0$ мм.

Объединение формул (4) и (8) дает расчетную формулу для углового ускорения

$$\varepsilon = \frac{4h}{t^2 d}. \quad (9)$$

Из уравнения динамики (1) вращающий момент силы натяжения

$$M_H = M_{\text{тр}} + I\varepsilon. \quad (10)$$

График функции $M_H = f(\varepsilon)$ представляет прямую линию и показан на рис. 2.

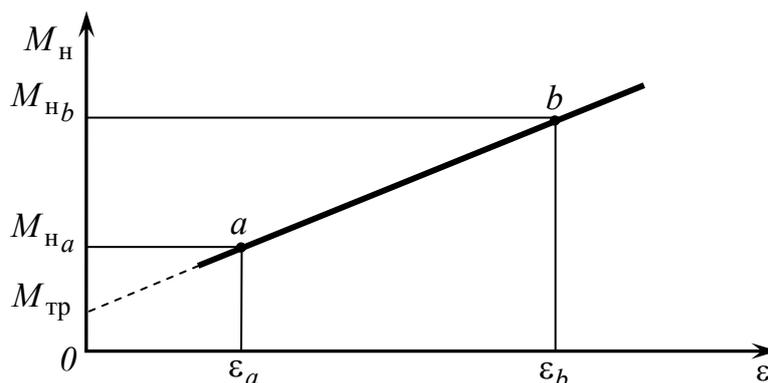


Рис. 2. Зависимость момента силы натяжения от углового ускорения

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать массу каретки с шайбами для $k=1 \dots 4$ по формуле

$$m = m_K + k m_{\text{ш}},$$

где m_K , $m_{\text{ш}}$ – массы каретки и шайбы, значения которых приведены в табл. 3. Результаты расчета занести в табл. 3.

2. Рассчитать среднее время \bar{t} движения каретки для каждого опыта.

3. Заполнить последние строки табл. 3, рассчитав угловое ускорение ε по формуле (9) и момент силы натяжения M_H по формуле (7).

4. По результатам расчетов построить график зависимости $M_H = f(\varepsilon)$.

5. Экстраполировать (продолжить) полученную прямую до пересечения с осью ординат и в соответствии с формулой (10), определить момент силы трения $M_{\text{тр}}$.

6. Из графика определить момент инерции I . Для этого произвольно выбрать на графике две достаточно удаленные точки a и b (см. рис. 2) и рассчитать момент инерции I по формуле:

$$I = \frac{\Delta M_{\text{н}}}{\Delta \varepsilon} = \frac{M_{\text{н}b} - M_{\text{н}a}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}. \quad (11)$$

Результатом работы являются:

1. График функции $M_{\text{н}} = f(\varepsilon)$ на миллиметровой бумаге с построением на нем точек a и b .
2. Значение момента силы трения $M_{\text{тр}}$, полученное из графика.
3. Значение момент инерции I крестовины, полученное из графика.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 3.
2. Расчет момента силы натяжения $M_{\text{н}}$ и углового ускорения ε .
3. График функции $M_{\text{н}} = f(\varepsilon)$ на миллиметровой бумаге с построением точек a и b .
4. Значение момента силы трения $M_{\text{тр}}$, определенное по графику.
5. Расчет момента инерции I по формуле (11).
6. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Поступательное и вращательное движение твердого тела. Плоское движение.

Литература: [1, п. 1.3].

2. Закономерности движения центра инерции (центр масс) твердого тела.

Литература: [1, п. 4.3]; [2, § 9].

3. Моменты силы и моменты импульса материальной частицы относительно точки и оси.

Литература: [2, § 18].

4. Закон изменения и сохранения момента импульса системы материальных точек и область его применения.

Литература: [1, п. 4.2]; [2, § 19].

5. Моменты инерции материальной точки, системы материальных точек и твердого тела относительно оси. Моменты инерции тел простой формы. Теорема Штейнера.

Литература: [1, п. 5.2]; [2, § 16, 18, 19].

6. Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси.

Литература: [1, п. 5.2]; [2, § 16, 18, 19].

7. Работа внешней силы при вращении твердого тела. Кинетическая энергия тела при плоском движении.

Литература: [1, п. 5.3]; [2, § 17].

8. В чем состоит аналогия между основными понятиями поступательного и вращательного движения?

9. Во сколько раз при прочих равных условиях изменится угловая скорость вращения тела, если его момент инерции уменьшится вдвое?

10. Угол поворота вала изменяется по закону $\varphi = 4t^2 + 7t + 2$. Момент инерции вала $I = 25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Определить момент силы в конце первой секунды.

11. Свинцовый и деревянный однородные шарики одинакового радиуса скатываются без скольжения с наклонной плоскости. Какой шарик скатится быстрее?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.
2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ КРЕСТОВИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ГРУЗОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить момент инерции крестовины при заданном расположении грузов на спицах относительно оси вращения.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

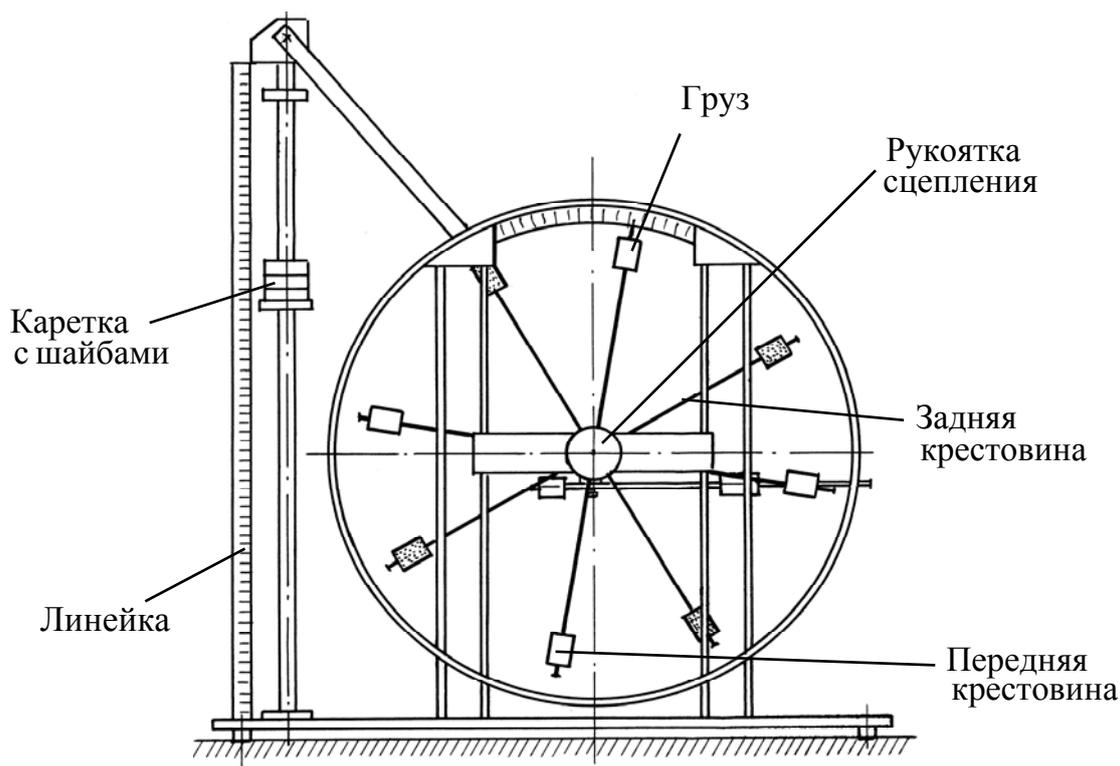


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются передняя крестовина и каретка с шайбами.

Высота подъема каретки измеряется линейкой, время – механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Линейка	700 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Установить грузы на спицах передней крестовины на пятой риске (заданная риска на спице должна располагаться у ближней к оси вращения поверхности груза).
3. Провести балансировку крестовины (см. с. 5).
4. Нить закрепить к ступице прочно.

Выполнение измерений

Работа состоит из двух частей.

Часть 1. Измерить момент силы трения крестовины. Для этого провести следующие операции.

1. Измерить нижний уровень H_0 каретки (отсчет по линейке вести по нижней плоскости каретки) и записать в табл. 2.
2. На каретку положить четыре шайбы.
3. Вращая крестовину рукой, намотать нить на ступицу и поднять каретку на высоту $H = 0,7$ м, крестовину удерживать рукой.
4. Отпустить крестовину и одновременно включить секундомер. Измерить время t движения каретки до уровня H_0 . Результат измерения записать в табл. 2.

Таблица 2

Определяемые величины	Количество шайб на каретке, k			
	4	3	2	1
m , г				
t , с				
ε , рад/с ²				
M_H , Н·м				
Исходные данные: $H_0 = \dots$; $h = H - H_0 = 0,7 - H_0 = \dots$ $m_k = 47$ г; $\Delta_{имk} = 1,0$ г; $m_{ш} = 220$ г; $\Delta_{имш} = 1,0$ г				

5. Опыт повторить с тремя, двумя и одной шайбой.

Часть 2. Измерить момент инерции крестовины при различных положениях грузов на спицах.

Для этого выполнить следующие операции.

1. Положить на каретку две шайбы.
2. Установить грузы на спицах на расстоянии одной риски от оси вращения, провести балансировку крестовины.
3. Вращая крестовину, намотать нить на ступицу и поднять каретку на уровень $H = 0,7$ м; удерживать крестовину рукой.
4. Отпустить крестовину и одновременно включить секундомер. Измерить время t движения каретки до нижнего уровня H_0 . Результат измерения записать в табл. 3

Таблица 3

Определяемые величины	Номер риски на спице					
	1	2	3	4	5	6
t , с						
R , м						
R^2 , м ²						
$(M_H - M_{тр})$, Н·м						
ε , рад/с ²						
I , кг·м ²						

5. Повторить опыт при положениях грузов на спицах, определяемых номером риски (см. табл. 3).

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Момент инерции вращающейся системы зависит от распределения массы относительно оси вращения. Эта зависимость имеет вид $I \sim R^2$. В данной работе R – расстояние от центра груза на спице до оси вращения. Положение груза на первой риске соответствует $R = 57$ мм. Расстояние между рисками 25 мм.

Основное уравнение динамики вращательного движения в проекции на ось вращения для вращающейся крестовины записывается следующим образом:

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = I\varepsilon, \quad (1)$$

где $M_{\text{н}}$ – момент силы натяжения нити, вызывающей вращение; $M_{\text{тр}}$ – момент сил трения; ε – угловое ускорение, I – момент инерции системы.

Вращение крестовины вызвано поступательным движением каретки с шайбами. Это движение описывается следующим уравнением динамики:

$$mg - F_{\text{н}} = ma, \quad (2)$$

здесь m – масса каретки с шайбами, $F_{\text{н}}$ – сила натяжения нити.

Сила натяжения из уравнения (2)

$$F_{\text{н}} = mg - ma. \quad (3)$$

Считая движение каретки равноускоренным, можно вычислить ускорение по формуле:

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

Подстановка выражения (4) в формулы (3) дает

$$F_{\text{н}} = m \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (5)$$

Соответственно момент силы натяжения

$$M_{\text{H}} = F_{\text{H}} r, \quad (6)$$

где r – радиус ступицы.

Выражая радиус ступицы через ее диаметр $r = \frac{d}{2}$ и учитывая формулу (5), получаем

$$M_{\text{H}} = \frac{md}{2} \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (7)$$

При отсутствии проскальзывания нити, угловое ускорение, с которым вращается система, связано с линейным ускорением через радиус r ступицы

$$a = \varepsilon r = \varepsilon \frac{d}{2}, \quad (8)$$

где d – диаметр ступицы, $d = 46,0$ мм.

Объединение формул (4) и (8) дает расчетную формулу для углового ускорения

$$\varepsilon = \frac{4h}{t^2 d}. \quad (9)$$

Из уравнения динамики (1) вращающий момент силы натяжения

$$M_{\text{H}} = M_{\text{тр}} + I\varepsilon. \quad (10)$$

График функции $M_{\text{H}} = f(\varepsilon)$ представляет собой прямую линию и показан на рис. 2.

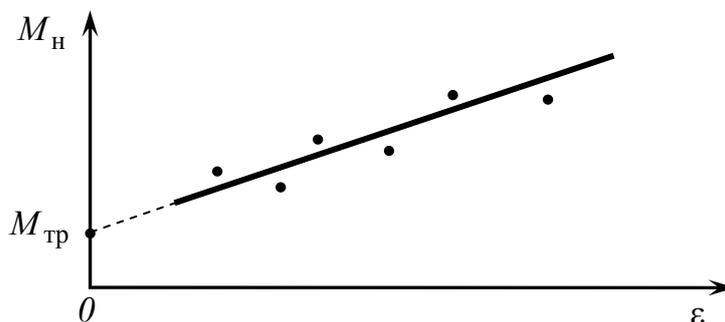


Рис. 2. Зависимость момента силы натяжения нити от углового ускорения

Обработка результатов измерений

Часть 1. Измерить момент силы трения крестовины. Для этого провести следующие операции.

1. Рассчитать массу каретки с шайбами для $k=1 \dots 4$ по формуле

$$m = m_{\text{к}} + k m_{\text{ш}},$$

где $m_{\text{к}}$, $m_{\text{ш}}$ – массы каретки и шайбы, значения которых приведены в табл. 2. Результаты расчета занести в табл. 2.

2. Рассчитав угловое ускорение ε по формуле (9) и вращающий момент $M_{\text{н}}$ по формуле (7), заполнить табл. 2.

3. По результатам расчетов построить график зависимости $M_{\text{н}} = f(\varepsilon)$; экстраполировать (продолжить) полученную прямую до пересечения с осью ординат и определить момент силы трения $M_{\text{тр}}$ (см. рис. 2).

Часть 2. Построить зависимость момента инерции крестовины от квадрата расстояния груза до оси вращения $I = f(R^2)$. Для этого провести следующие операции.

1. Рассчитать значения R^2 и занести результаты в табл. 3.

2. Взять из табл. 2 значение момента $M_{\text{н}}$ для опыта с двумя шайбами (выделено рамкой) и с учетом определенного в п. 3 первой части обработки результатов измерений момента силы трения $M_{\text{тр}}$, записать в табл. 3 значение $(M_{\text{н}} - M_{\text{тр}})$.

3. Заполнить последние строки табл. 3, рассчитав угловое ускорение по формуле (9) и момент инерции по формуле

$$I = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}.$$

4. Построить график зависимости $I = f(R^2)$, примерный вид которого представлен на рис. 3.

5. Экстраполировать (продолжить) полученную прямую до пересечения с осью ординат и определить момент инерции ступицы со спицами $I_{\text{ст}}$.

6. Сравнить полученное значение с расчетным ($I_{\text{ст.расч}} = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$). Для этого рассчитать абсолютное и относительное отклонение найденного момента инерции ступицы от расчетного.

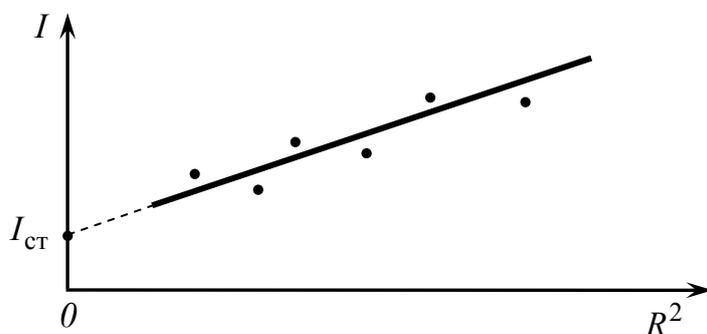


Рис. 3. Зависимость момента инерции крестовины от квадрата радиуса

Результатом работы являются:

1. График функции $M_{\text{н}} = f(\varepsilon)$ на миллиметровой бумаге с построением на нем величины $M_{\text{тр}}$.
2. График функций $I = f(R^2)$ на миллиметровой бумаге с построением на нем величины $I_{\text{ст}}$.
3. Значение момента силы трения $M_{\text{тр}}$, полученное из графика.
4. Значение момента инерции ступицы со спицами $I_{\text{ст}}$, полученное из графика.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 2, 3.
2. Расчет момента силы натяжения $M_{\text{н}}$ и углового ускорения ε .
3. График функции $M_{\text{н}} = f(\varepsilon)$ на миллиметровой бумаге.
4. Значение момента силы трения $M_{\text{тр}}$, определенное по графику.
5. Расчет момента инерции.
6. График функций $I = f(R^2)$ на миллиметровой бумаге.

7. Значение момента инерции ступицы со спицами $I_{ст}$ определенное по графику.

8. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Поступательное и вращательное движение твердого тела. Плоское движение.

Литература: [1, п. 1.3].

2. Закономерности движения центра инерции (центр масс) твердого тела.

Литература: [1, п. 4.3]; [2, § 9].

3. Моменты силы и моменты импульса материальной частицы относительно точки и оси.

Литература: [2, § 18].

4. Закон изменения и сохранения момента импульса системы материальных точек и область его применения.

Литература: [1, п. 4.2]; [2, § 19].

5. Моменты инерции материальной точки, системы материальных точек и твердого тела относительно оси. Моменты инерции тел простой формы. Теорема Штейнера.

Литература: [1, п. 5.2]; [2, § 16, 18, 19].

6. Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси.

Литература: [1, п. 5.2]; [2, § 16, 18, 19].

7. Работа внешней силы при вращении твердого тела. Кинетическая энергия тела при плоском движении.

Литература: [1, п. 5.3]; [2, § 17].

8. В чем состоит аналогия между основными понятиями поступательного и вращательного движения?

9. Во сколько раз при прочих равных условиях изменится угловая скорость вращения тела, если его момент инерции уменьшится вдвое?

10. Угол поворота вала изменяется по закону $\varphi = 4t^2 + 7t + 2$. Момент инерции вала $I = 25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Определить момент силы в конце первой секунды.

11. Свинцовый и деревянный однородные шарики одинакового радиуса скатываются без скольжения с наклонной плоскости. Какой шарик скатится быстрее?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.

3. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Метод. указания к лабораторным работам для студ. всех спец./ Под ред. В.А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 57 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.1

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить характеристики затухающих колебаний: период T , круговую частоту ω , коэффициент затухания β .

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

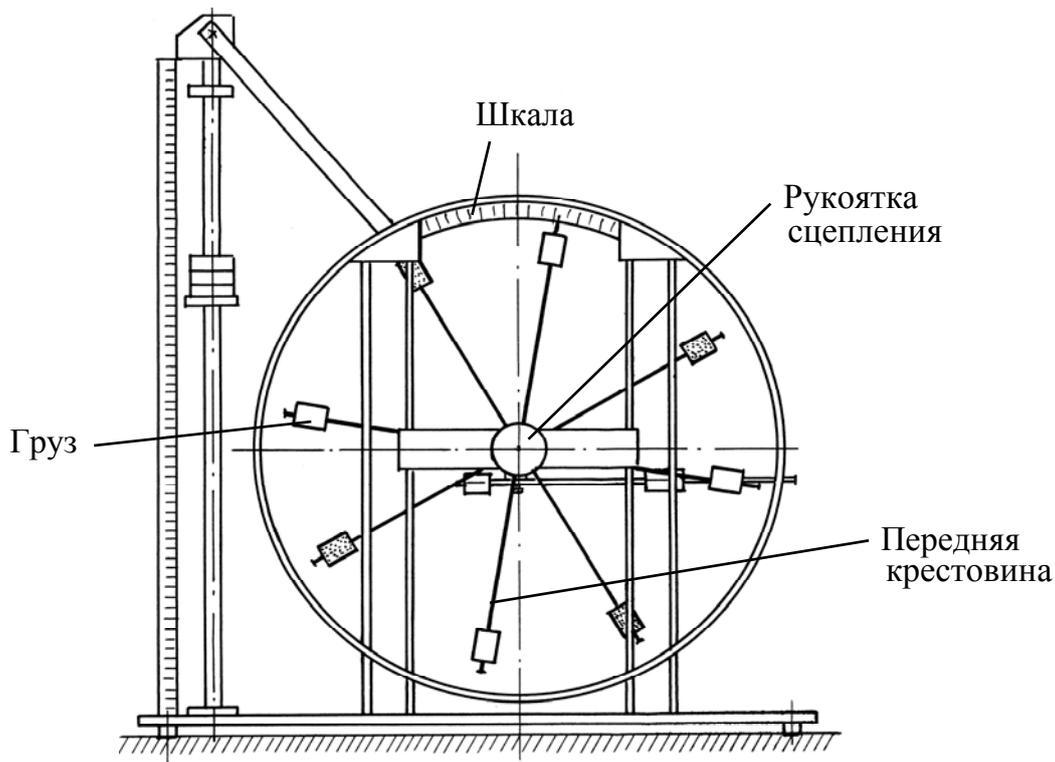


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используется передняя крестовина.

Угол отклонения маятника отсчитывается по шкале в угловых градусах. Время измеряется механическим секундомером. Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность, $\Delta_{и}$
Шкала	60°	1°/дел.	–	1°
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Вращая рукоятку сцепления против часовой стрелки, расцепить переднюю и заднюю крестовины.
2. Отсоединить нить от ступицы.
3. Установить груз на спице со стрелкой вплотную к ступице.
4. На остальных спицах установить грузы на расстоянии третьей риски (риска должна находиться у поверхности груза, расположенной ближе к оси вращения крестовины).
5. Совместить стрелку спицы с центральной отметкой шкалы ($\varphi_0 = 30^\circ$), перемещая один из грузов на боковых спицах.

Выполнение измерений

1. Измерить период затухающих колебаний. Для этого начальное положение стрелки маятника совместить с началом шкалы ($\varphi = 0$) и три раза измерить время двадцати ($N = 20$) колебаний маятника. Записать результаты измерений

$$t_1 = \dots \text{с}; \quad t_2 = \dots \text{с}; \quad t_3 = \dots \text{с}.$$

Рассчитать среднее время

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{3}(t_1 + t_2 + t_3) \quad (1)$$

и период колебаний

$$T = \frac{\bar{t}}{N}. \quad (2)$$

2. Построить зависимость амплитуды затухающих колебаний физического маятника.

Для этого отвести стрелку маятника влево до совмещения с нулем шкалы, затем отпустить ее и одновременно включить секундомер. Маятник будет совершать свободные затухающие колебания. Не останавливая секундомер, измерить время, когда угол отклонения маятника будет равен 5° , 10° , 15° , 20° , 25° . Результаты измерений занести в табл. 2. Измерения удобно проводить вдвоем: один следит за изменением угла отклонения φ , а второй – за текущим временем по секундомеру. Опыт повторить три раза. Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Угол отклонения по шкале φ	0°	5°	10°	15°	20°	25°
$t_1, \text{с}$	0					
$t_2, \text{с}$	0					
$t_3, \text{с}$	0					
$\bar{t}, \text{с}$	0					
A, \dots°						

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Модель физического маятника показана на рис. 2.

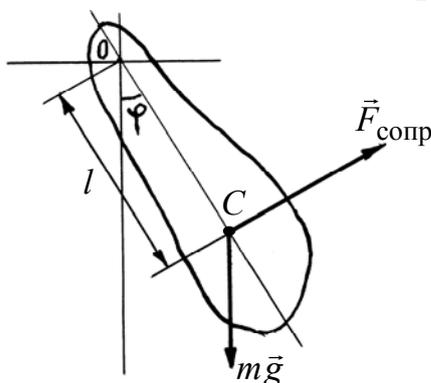


Рис. 2. Физический маятник

Движение физического маятника подчиняется основному уравнению динамики вращательного движения

$$I\vec{\varepsilon} = \vec{M}_{\text{тяж}} + \vec{M}_{\text{сопр}}, \quad (3)$$

где I – момент инерции тела относительно оси качания; $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение; $\vec{M}_{\text{тяж}}$ – момент силы тяжести; $\vec{M}_{\text{сопр}}$ – момент силы сопротивления.

Угловое ускорение

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}. \quad (4)$$

Сила сопротивления

$$F_{\text{сопр}} = -r\upsilon, \quad (5)$$

где r – коэффициент сопротивления среды.

Момент силы сопротивления

$$M_{\text{сопр}} = F_{\text{сопр}} l, \quad (6)$$

где l – расстояние между осью качания O и центром масс маятника C .

Подстановка выражения (5) в формулу (6) позволяет получить

$$M_{\text{сопр}} = -r\upsilon l = -r \frac{ds}{dt} l = -r \frac{d(l\varphi)}{dt} l = -rl^2 \frac{d\varphi}{dt}.$$

Момент силы тяжести

$$M_{\text{тяж}} = -mgl \sin\varphi.$$

Для малых углов отклонения ($\varphi \leq 15^\circ$) с погрешностью менее 1 % $\sin\varphi \approx \varphi$, где φ – в радианах, поэтому

$$M_{\text{тяж}} = -mgl\varphi. \quad (8)$$

Подставляя формулы (4), (7), (8) в уравнение динамики (3), получаем уравнение свободных затухающих колебаний маятника

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -mgl\varphi - rl^2 \frac{d\varphi}{dt}. \quad (9)$$

Введем обозначения

$$\omega_0^2 = \frac{mgl}{I}, \quad \beta = \frac{rl^2}{2I},$$

где ω_0 – циклическая частота собственных колебаний маятника; β – коэффициент затухания.

С учетом введенных обозначений уравнение (9) можно привести к виду

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2\varphi = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$\varphi = A_0 e^{-\beta t} (\cos \omega t + \alpha_0), \quad (11)$$

где A_0 – амплитуда в начальный момент времени; ω – циклическая частота затухающих колебаний; α_0 – начальная фаза.

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad (12)$$

где ν – частота; T – период.

Циклическая частота вынужденных колебаний связана с циклической частотой собственных колебаний соотношением

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (13)$$

Соответственно циклическая частота собственных колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \beta^2}, \quad (14)$$

а период собственных колебаний

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}. \quad (15)$$

Логарифмический декремент колебаний связан с коэффициентом затухания и периодом затухающих колебаний

$$\Lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T. \quad (16)$$

Как видно из уравнения (11), амплитуда при затухающих колебаниях уменьшается по экспоненциальному закону

$$A = A_0 e^{-\beta t} = A_0 e^{-\frac{\Lambda}{T} t}. \quad (17)$$

Если известна кривая изменения амплитуды колебаний, то коэффициент затухания вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{\ln A' - \ln A''}{t'' - t'}, \quad (18)$$

где t' и t'' – два последующих произвольных момента времени; A' и A'' – соответствующие им значения амплитуд колебаний.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать среднее время двадцати колебаний и период колебаний по формулам (1) и (2).

2. По данным табл. 2 рассчитать средние времена \bar{t} для заданных углов отклонения маятника φ и амплитуду колебаний по формуле

$$A = \varphi_0 - \varphi, \quad \varphi_0 = 30^\circ.$$

3. Полученные результаты занести в соответствующие строки табл. 2.

4. Построить график $A = f(t)$, примерный вид которого показан на рис. 3.

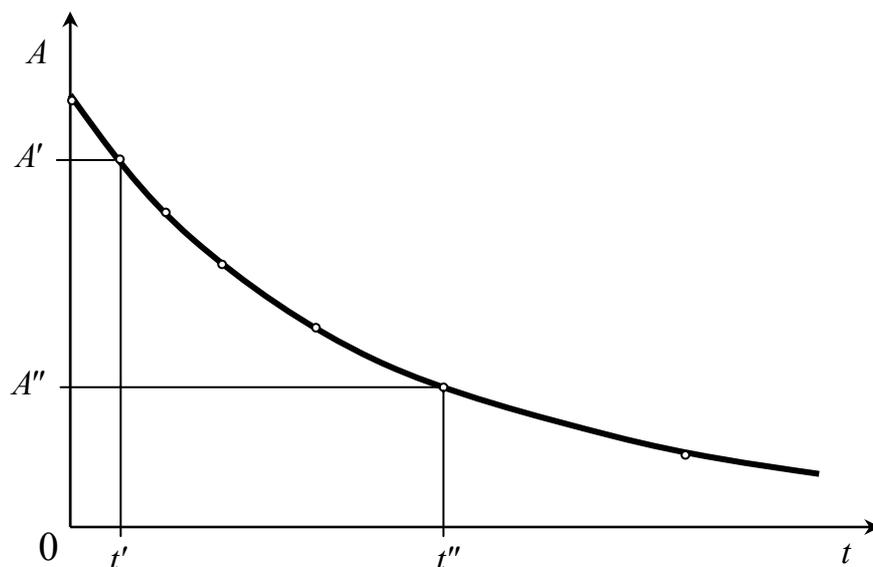


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний от времени

5. По графику $A = f(t)$ для амплитуд $A' = 25^\circ$ и $A'' = 10^\circ$, по формуле (18) рассчитать коэффициент затухания β .

6. Зная период T , рассчитать циклическую частоту ω затухающих колебаний по формуле (12).

7. По формулам (14) и (15) рассчитать циклическую частоту ω_0 и период T_0 собственных колебаний.

8. Зная период затухающих колебаний T и коэффициент затухания β , рассчитать логарифмический декремент колебаний Λ по формуле (16).

Результатом работы являются:

1. График функции $A = f(t)$ на миллиметровой бумаге с построением точек A' и A'' .

2. Значение периода затухающих колебаний.

3. Значение коэффициента затухания.

4. Значение циклической частоты затухающих колебаний.

5. Значение периода собственных колебаний.

6. Значение циклической частоты собственных колебаний.

7. Значение логарифмического декремента колебаний.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 2.

2. Расчет периода затухающих колебаний.

3. График функции $A = f(t)$ на миллиметровой бумаге с построением точек A' и A'' .

4. Расчет коэффициента затухания.

5. Расчет циклической частоты затухающих колебаний.

6. Расчет циклической частоты и периода собственных колебаний.

7. Расчет логарифмического декремента колебаний.

8. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он

должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация колебательных процессов и основные характеристики колебаний.

Литература: [1, п. 6.1]; [2, § 140].

2. Собственные гармонические колебания.

Литература: [1, п. 6.3]; [2, § 141].

3. Гармонический осциллятор и его механическая энергия.

Литература: [1, п. 6.3]; [2, § 141].

4. Математический маятник. Период колебаний (вывод).

Литература: [1, п. 6.4]; [2, § 142].

5. Физический маятник. Период колебаний (вывод).

Литература: [1, п. 6.4]; [2, § 142].

6. Затухающие колебания.

Литература: [1, п. 6.6]; [2, § 146].

7. Вынужденные колебания.

Литература: [1, п. 6.7]; [2, § 147].

8. Резонанс.

Литература: [1, п. 6.7]; [2, § 147].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 1. Классическая механика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 259 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ОФОРМЛЕНИЕ ПРОТОКОЛА И ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Протокол проведения лабораторной работы оформляется на двойном листе из тетради в клетку.

1-я страница

РАБОЧИЙ ПРОТОКОЛ И ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № (название работы) Номер варианта задания Группа Студент Фамилия И.О. Преподаватель Фамилия И.О

2-я и 3-я страницы

Цель работы:	Таблицы с экспериментальными данными
Рисунок:	
Расчетные формулы:	
	Расчеты (начало):

4-я страница

Расчеты (продолжение): Результаты работы:
--

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

Графики необходимы для наглядного представления экспериментальных и расчетных данных.

Графики должны легко читаться и быть понятными. Заголовки, поясняющие надписи, числовые значения рекомендуется выполнять шрифтом высотой не менее 4 мм. Графики выполняют карандашом на бумаге с координатной миллиметровой сеткой (миллиметровая бумага) форматом не менее чем А5. Готовые графики вкладываются в отчет по лабораторной работе.

Координатная сетка

В простейшей двумерной прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент функции) принято откладывать на горизонтальной оси (оси абсцисс), а зависимую переменную (функцию) – на вертикальной оси (оси ординат).

На координатных осях должны быть указаны: обозначения откладываемых величин, единицы их измерения, шкала числовых значений величин.

Оси координат могут быть со шкалами и без шкал. В обоих случаях оси координат рекомендуется заканчивать стрелками. Оси координат, следует выполнять сплошной линией толщиной 0,8 до 1,0 мм.

Масштабы

Масштаб изображения может быть как линейным, так и неллинейным (например, логарифмическим).

Масштаб изображения может быть разным для каждой оси, например: по одной оси 1; 2; 3; 4; 5; ..., а по другой – 5; 10; 15; 20; или по одной оси линейный, а по другой – логарифмический. В некоторых случаях масштабы положительного и отрицательного направлений оси могут быть разными.

Масштаб выбирают таким образом, чтобы:

- а)* график занимал максимально возможную площадь чертежа;
- б)* линия графика была равномерно растянута вдоль обеих осей (если график представляет собой прямую, то рекомендуется, чтобы угол ее наклона к осям не сильно отличался от $\pm 45^\circ$);

в) координаты любой точки можно было определить легко и быстро по шкалам на осях.

Масштаб является удобным для чтения графика, если в одном сантиметре содержится одна единица величины (или две, пять, десять, двадцать, пятьдесят и т. д.). Примеры шкал: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; ..., или 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,10, ..., или 1; 2; 3; 4; 5; ..., или 2; 4; 6; 8; 10, ..., или 5; 10; 15; 20; ...

Масштаб, при котором чтение графика затруднено, считается неприемлемым.

Следует избегать неудобного, (к сожалению, нередко используемого начинающими обучение студентами) масштаба: три сантиметра на единицу величины или в одном сантиметре три единицы (например, 1; 3; 6; 9; ...). Такой неудачный выбор привёл бы к крайне неудобному чтению координат точек на оси.

Шкалы

Шкалы имеют основные и промежуточные деления. На миллиметровой бумаге основные деления должны совпадать с толстыми линиями.

Основные деления снабжают числами. Частоту нанесения числовых значений делений шкал следует выбирать с учетом удобства определения координат. Числа у шкал следует размещать вне поля графика и располагать горизонтально, наносить равномерно по всей оси и без пропусков.

Начало координат, если это не оговорено особо, может не совпадать с нулевыми значениями шкалы. Его выбирают таким образом, чтобы график занимал максимально возможную площадь чертежа.

Обозначение величин

Нанесение единиц измерения

Обозначения величин следует размещать в конце шкалы вместе с единицей измерения через запятую, например: p , Па; T , К; t , °С; h , м.

Множитель 10^n (n – целое число) предпочтительно располагается рядом с единицей измерения, например: p , 10^6 Па; или p , МПа; h , 10^{-3} м; или h , мм.

Изображение точек

Точки на графике, полученные путем измерений или расчетов должны изображаться четко и крупно: в виде крестиков треугольников, ромбиков и т. п. (размер символа должен быть в 2–3 раза больше толщины линии). Рекомендуется использовать следующие символы: \times , $+$, Δ , \blacktriangle , \diamond , \blacklozenge , \square , \blacksquare , \circ , \bullet и т.п. Если на одном графике построено несколько зависимостей, то для разных зависимостей следует использовать различные символы.

При построении теоретической линии на графике не показывают точки, через которые проводят линию.

Координаты точек, полученных путем измерений или расчетов, на осях не указывают. Пунктирные линии, определяющие координаты таких точек, не проводят.

Линии

Линия графика должна быть плавной. При выборе формы усредняющей кривой для каждого графика следует руководствоваться следующими правилами. Если известно теоретическое уравнение, описывающее эту зависимость, то нужно построить кривую, соответствующую этому уравнению. Если теоретическое уравнение неизвестно, то проводят наиболее простую и плавную линию (прямую или кривую), проходящую через массив экспериментальных точек, усредняя их разброс.

Линию следует проводить так, чтобы количество точек по обе стороны от нее было приблизительно одинаковым и как можно ближе к точкам, но, не обязательно пересекая их. Не следует соединять точки ломаной линией.

При проведении линии следует заранее выяснить: должна ли она, согласно теории, проходить через какую-либо конкретную точку, например через начало координат (0; 0).

Пример. Пусть требуется построить график зависимости пути S от времени t при равномерном движении тела. Экспериментальные данные приведены в табл. П.1.

Таблица П.1

$t, \text{с}$	10	12	14	15	16	18	19	22
$S, \text{м}$	20	23	30	31	34	34	38	43

На рис. П.1 показан график $S(t)$ с наиболее типичными ошибками.

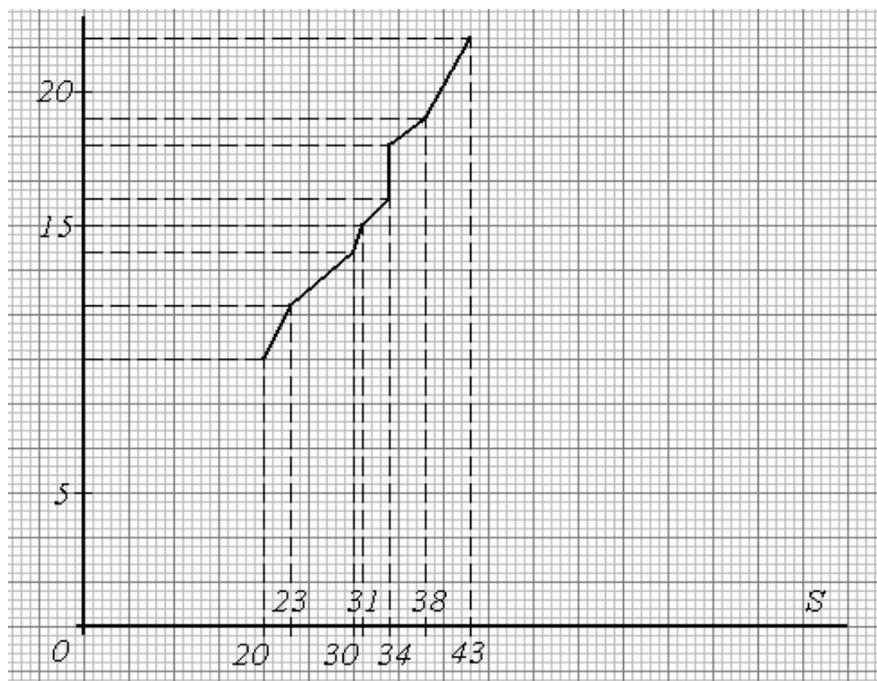


Рис. П.1

При построении графика сделаны следующие ошибки:

– неправильно выбраны направления осей координат. Время t является независимой переменной (аргументом) и должно быть отложено по оси абсцисс (горизонтальной), а путь S является зависимой переменной (функцией) и должен быть отложен по оси ординат (вертикальной);

– на оси ординат не указана отложенная величина (время t) и единицы ее измерения (с);

– на оси абсцисс не указана единица измерения пути S , м;

– некоторые числовые значения шкалы расположены на поле графика;

– масштабные деления на оси времени нанесены неравномерно. Если есть деления 0 и 5, то следующим должно быть 10 и т. д.;

– площадь чертежа использована не полностью. Поскольку из условия примера не следует, что оси координат должны начинаться с нулевых значений, то начало координат можно сместить и за счет этого увеличить масштаб графика;

- график сжат по оси абсцисс из-за двух ошибок: неправильно выбранного начала координат и неудачного (слишком мелкого) масштаба;
- выбран крайне неудобный масштаб по оси времени, поэтому чтение графика затруднено;
- не выделены символами экспериментальные точки;
- на оси пути нет масштабных делений;
- на оси пути нанесены координаты экспериментальных точек;
- проведены лишние пунктирные линии;
- неправильно соединены экспериментальные точки: зависимость пути от времени при равномерном движении заведомо линейна, и график должен представлять собой прямую линию, а не ломаную.

Правильно оформленный график представлен на рис. П.2.

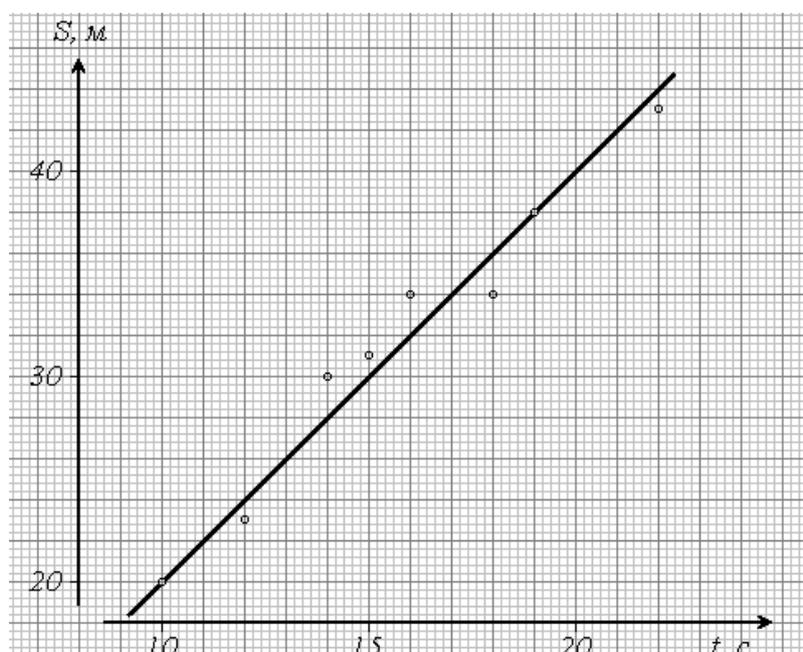


Рис. П.2

Допускается выполнение графиков с помощью компьютерных программ (например, Excel), но и в этом случае графики должны соответствовать всем изложенным здесь требованиям (в частности, иметь мелкую координатную, например, миллиметровую сетку). Чтобы мелкая сетка не мешала восприятию экспериментальных точек на графике и точному определению их координат, сетку можно задать в виде тонких штриховых линий в серых полутонах, соответствующих промежуточным делениям шкалы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛОНА ПРЯМОЙ НА ГРАФИКЕ

Во многих случаях необходимо определить по графику наклон прямой, который равен коэффициенту a в уравнении линейной зависимости

$$y = a x + b .$$

Для этого нужно выбрать две точки на прямой, отстоящие достаточно далеко друг от друга и определить их координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда коэффициент a вычисляется по формуле:

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} .$$

Пример. На рисунке П.3 изображена зависимость пройденного пути от времени.

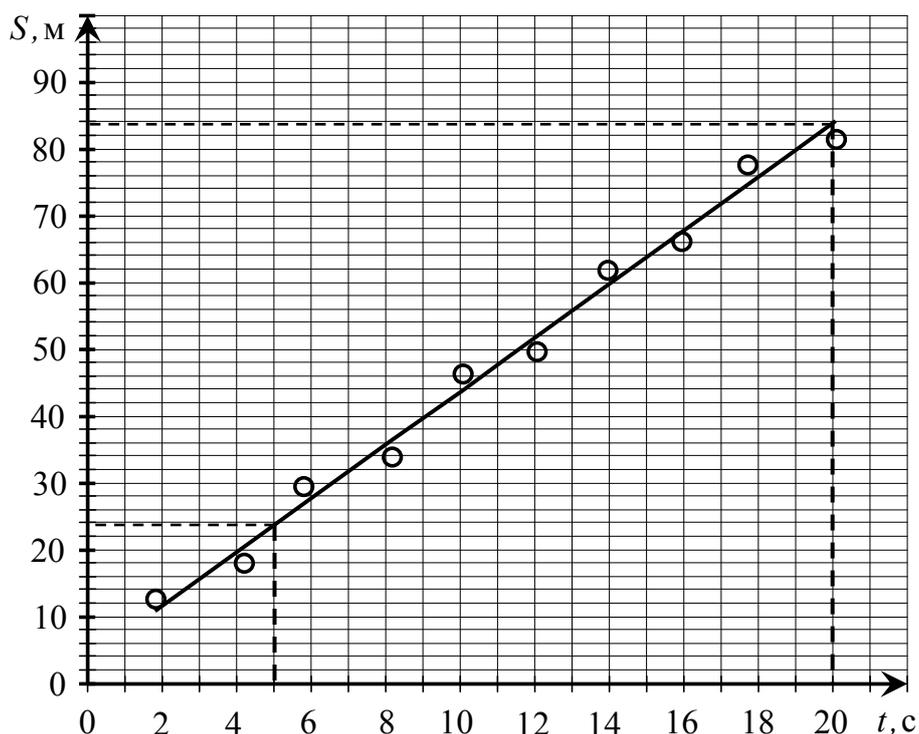


Рис. П.3

Наклон прямой на этом графике получается так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{83,3 - 25,4}{20 - 5} = \frac{57,9}{15} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выбирать точки на прямой удобнее всего так, чтобы знаменатель (разность $x_2 - x_1$) принимал значение, позволяющее результат деления легко вычислить устно, чтобы избежать возможной ошибки расчёта.

Например, на рисунке П.3 можно было бы выбрать вторую точку $t_2 = 15$ с вместо $t_2 = 20$ с. Она находится еще достаточно далеко от первой точки, но знаменатель дроби будет равен 10 с, и это существенно облегчает деление.

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{64,0 - 25,4}{15 - 5} = \frac{38,6}{10} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Всякое число состоит из цифр, определяющих количество единиц в различных разрядах числа. Например, в числе 1726,34 имеется шесть цифр. Число содержит 1 тысячу, 7 сотен, 2 десятка, 6 единиц, 3 десятых, 4 сотых. Старший разряд в числе – тысячи (1 тысяча), младший – сотые (4 сотых).

Цифры в числе могут быть значащими и незначащими. *Значащими цифрами числа являются все цифры данного числа, кроме нулей, стоящих слева.* Нули, стоящие в середине или в конце числа (справа) являются значащими цифрами, так как обозначают отсутствие единиц в соответствующем разряде. При этом цифры множителя 10^n не учитываются. Примеры определения количества значащих цифр в числах представлены в табл. П 1.

Таблица П 3

Примеры определения количества значащих цифр

Число	Количество значащих цифр
12	2
12,0	3
12,4	3
120	3
124	3
1,24·10⁻³	3
0,1240	4
0,1046	4
0,526·10⁶	3
0,206·10⁻³	3
0,200·10⁻³	3
0,020·10⁻³	2

В процессе измерений получают измеренное значение величины \bar{x} , его абсолютную Δ_x и относительную ϵ_x погрешности. Математический анализ показывает, что изложенные в данном пособии методы обработки результатов дают значение погрешности с ошибкой 30 %. Поэтому, чтобы не создавать ложного впечатления о точности прове-

денных измерений, в погрешностях Δ_x и ϵ_x следует ограничивать число значащих цифр.

Погрешности измерения должны содержать не более двух (т. е. одну или две) значащих цифр. Для этого следует использовать следующие правила и порядок ограничения числа значащих цифр.

1. Если первая значащая цифра в абсолютной погрешности Δ_x **1, 2, 3**, то в погрешности оставляем две значащие цифры. Если первая значащая цифра в погрешности **4, 5, 6, 7, 8, 9**, то в погрешности оставляем одну значащую цифру (см. табл. П 2).

2. Измеренное значение \bar{x} должно заканчиваться тем же младшим разрядом, что и абсолютная погрешность Δ_x . Например, если в абсолютной погрешности Δ_x оставлен младший разряд – единицы, то и в измеренном значении должен быть оставлен младший разряд – единицы (см. табл. П 3).

3. В относительной погрешности число значащих цифр ограничиваем по тем же правилам, что и в абсолютной погрешности (см. табл. П 2).

При ограничении числа значащих цифр используем операцию округления. Округление числа представляет собой отбрасывание значащих цифр справа после определенного разряда с возможным изменением цифры этого разряда.

Существуют следующие правила округления.

1. Если первая из отбрасываемых цифр меньше чем **5**, то цифра предыдущего разряда не изменяется.

2. Если первая из отбрасываемых цифр больше чем **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

3. Если отбрасываются несколько цифр и первая из отбрасываемых цифр **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

4. Если отбрасывается только одна цифра **5**, а за ней нет цифр, то округление производится до ближайшего четного числа, т. е. цифра предыдущего разряда остается неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная.

5. Округление следует выполнять сразу до желаемого числа значащих цифр, а не по этапам, что может привести к ошибкам.

Примеры ограничения числа значащих цифр в погрешности и в измеренном значении представлены в табл. П 2 и П 3.

**Примеры ограничения числа значащих цифр
и округления погрешности**

Пример	Пояснения
0,154 \approx 0,15 1,967 \approx 2,0 19,37 \approx 19 144,1 \approx 0,14 \cdot 10 ³	Первая значащая цифра погрешности 1 , поэтому оставляем две значащие цифры. Замечание. При необходимости число записывают с множителем 10 ⁿ , где n – показатель степени.
0,394 \approx 0,39 3,94 \approx 3,9	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры.
0,397 \approx 0,4 3,97 \approx 4	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры, но так как при округлении цифра 3 превращается в цифру 4 , то оставляем только одну значащую цифру.
0,461 \approx 0,5 4,78 \approx 5 41,1 \approx 4 \cdot 10 4123 \approx 4 \cdot 10 ³	Первая значащая цифра погрешности 4 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
0,917 \approx 0,9 9,17 \approx 9 91,7 \approx 9 \cdot 10 9123 \approx 9 \cdot 10 ³	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
0,0977 \approx 0,10 0,956 \approx 1,0 956 \approx 1,0 \cdot 10 ³	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру, но так как при округлении цифра 9 превращается в число 10 , т.е. первая значащая цифра 1 , то оставляем две значащие цифры.
2,45 \approx 2,4 2,35 \approx 2,4	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Отбрасывается только одна цифра 5 , а за ней нет значащих цифр, поэтому округление производим до ближайшего четного числа.
2,451 \approx 2,5 2,351 \approx 2,4	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Первая из отбрасываемых цифр 5 , но отбрасываются две цифры, поэтому предыдущий разряд числа увеличиваем на единицу.

**Примеры ограничения количества значащих цифр
в измеренном значении и его погрешности**

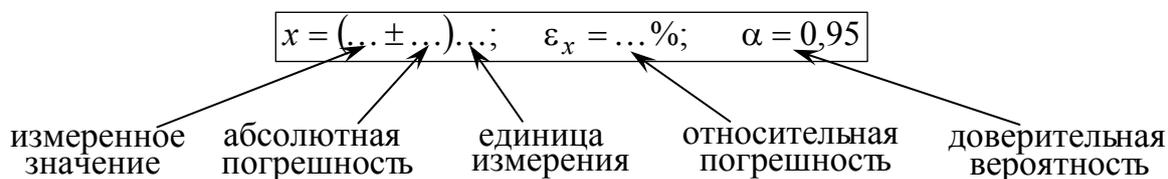
Пример	Пояснения
$43,234 \pm 0,0417 \approx 43,23 \pm 0,04$ $32,3754 \pm 0,0917 \approx 32,38 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$4,3234 \pm 0,0397 \approx 4,32 \pm 0,04$ $43,2364 \pm 0,0522 \approx 43,24 \pm 0,05$ $432,37 \pm 0,0917 \approx 432,37 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$432,37 \pm 0,956 \approx 432,4 \pm 1,0$ $432,3477 \pm 2,45 \approx 432,3 \pm 2,4$ $432,134 \pm 2,86 \approx 432,1 \pm 2,9$ $43,234 \pm 3,94 \approx 43,2 \pm 3,9$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, последний разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 0,297 \approx 43,2 \pm 3,0$ $432,345 \pm 1,441 \approx 4323,4 \pm 1,4$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 3,97 \approx 43 \pm 4$ $432,364 \pm 5,55 \approx 432 \pm 6$ $432,34 \pm 39,4 \approx 432 \pm 39$ $432,34 \pm 19,37 \approx 432 \pm 19$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>
$432,34 \pm 49,1 \approx (43 \pm 5) \cdot 10$ $426,34 \pm 41,1 \approx (43 \pm 4) \cdot 10$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10, то младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>

Пример	Пояснения
$432,34 \pm 39,7 \approx (4,3 \pm 0,4) \cdot 10^2$ $437,34 \pm 59,7 \approx (4,4 \pm 0,6) \cdot 10^2$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10^2, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$4326,4 \pm 211 \approx (4,33 \pm 0,21) \cdot 10^3$ $4323,4 \pm 219 \approx (4,32 \pm 0,22) \cdot 10^3$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^3, то младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$0,0004623 \pm 0,00017 \approx$ $\approx (4,6 \pm 1,7) \cdot 10^{-4}$	<p>В погрешности оставляем две значащих цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^{-4}, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>

Если табличные или экспериментальные данные приводятся без указания погрешности, то обычно считается, что эта погрешность составляет $\pm 0,5$ последней значащей цифры.

Форма записи конечного результата измерений

Конечный результат измерений записывается в виде



СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица П 6

Единицы СИ

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное

Основные единицы

Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s

Дополнительные единицы

Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr

Некоторые производные единицы

Волновое число	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Давление	паскаль	Па	Pa
Импульс	килограмм-метр на секунду	кг·м/с	kg·m/s
Импульс силы	ньютон-секунда	Н·с	N·s
Коэффициент затухания	секунда в минус первой степени	с^{-1}	s^{-1}
Коэффициент ослабления	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Модуль продольной упругости	паскаль	Па	Pa
Модуль сдвига	паскаль	Па	Pa
Момент импульса	килограмм-метр в квадрате на секунду	кг·м ² /с	kg·m ² /s

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	междуна- родное
Мощность	ватт	Вт	W
Объем, вместимость	кубический метр	м ³	m ³
Период	секунда	с	s
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³
Площадь	квадратный метр	м ²	m ²
Работа	джоуль	Дж	J
Сила	ньютон	Н	N
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	rad/s
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	rad/s ²
Удельный объем	кубический метр на килограмм	м ³ /кг	m ³ /kg
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²
Частота вращения	секунда в минус первой степени	с ⁻¹	s ⁻¹
Частота периодического процесса	герц	Гц	Hz
Энергия	джоуль	Дж	J

ДЕСЯТИЧНЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

Таблица П 7

Десятичные кратные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
экса	Э	E	10^{18}	1 Эм = 10^{18} м
пета	П	P	10^{15}	1 Пм = 10^{15} м
тера	Т	T	10^{12}	1 Тм = 10^{12} м
гига	Г	G	10^9	1 Гм = 10^9 м
мега	М	M	10^6	1 Мм = 10^6 м
кило	к	k	10^3	1 км = 10^3 м
гекто	г	h	10^2	1 гм = 10^2 м
дека	да	da	10^1	1 дам = 10^1 м

Таблица П 8

Десятичные дольные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
деци	д	d	10^{-1}	1 дм = 10^{-1} м
сантиметры	с	c	10^{-2}	1 см = 10^{-2} м
милли	м	m	10^{-3}	1 мм = 10^{-3} м
микро	мк	μ	10^{-6}	1 мкм = 10^{-6} м
нано	н	n	10^{-9}	1 нм = 10^{-9} м
пико	п	p	10^{-12}	1 пм = 10^{-12} м
фемто	ф	f	10^{-15}	1 фм = 10^{-15} м

Правила образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

1. Приставку или её обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или с её обозначением.

2. Присоединение двух и более приставок подряд не допускается.

Правильно:

мегапаскаль
МПа
микрометр
мкм
нанофарад
нФ

Неправильно:

килокилопаскаль
ккПа
миллимиллиметр
mmm
миллимикрофарад
ммкФ

3. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или ее обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

Правильно:

килопаскаль-секунда на метр
 $\frac{\text{кПа} \cdot \text{с}}{\text{м}}$
килоньютон на метр
 $\frac{\text{кН}}{\text{м}}$

Неправильно:

паскаль-килосекунда на метр
 $\frac{\text{Па} \cdot \text{кс}}{\text{м}}$
ньютон на миллиметр
 $\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$

Присоединять приставку ко второму множителю произведения или к знаменателю допускается лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены и переход к единицам, образованным по правилу, связан с трудностями, например: тонна-километр (т·км), вольт на сантиметр (В/см), ампер на квадратный миллиметр (А/мм²).

Рекомендации по выбору десятичных кратных и дольных единиц СИ

Выбор десятичной кратной или дольной единицы СИ определяется удобством ее применения.

Кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

Для уменьшения вероятности ошибок при расчётах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10, т. е. множителями 10^n .

В десятичных единицах СИ нет множителей 10^{-4} , 10^4 , 10^{-5} , 10^5 , 10^{-7} , 10^7 и т. п. Поэтому следует применять только те множители, которые приведены в табл. 1, 2.

В десятичных единицах СИ множители 10^{-2} , 10^{-1} , 10^1 , 10^2 используются очень редко, только в виде исключения, поэтому не следует их применять.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Таблица П 9

Основные физические постоянные (округленные значения)

Величина	Обозначение	Значение величины
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
	\hbar	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Элементарный электрический заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Комптоновская длина волны электрона	λ_K	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Постоянная Ридберга	R	$1,097 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31$ Дж/(моль · К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Боровский радиус	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Стенд лаборатории механики	4
Лабораторная работа № 1.1. Измерение плотности твердых тел простейшей формы	8
Лабораторная работа № 1.2. Измерение объема твердых тел простейшей формы	15
Лабораторная работа № 2.1. Исследование равноускоренного прямолинейного движения каретки с шайбами	21
Лабораторная работа № 2.2. Исследование равноускоренного вращательного движения крестовины	29
Лабораторная работа № 3.1. Определение коэффициентов трения покоя и скольжения пары «ступица – тормозная колодка»	37
Лабораторная работа № 3.2. Определение эффективной массы крестовин	48
Лабораторная работа № 4.1. Определение момента инерции вращающейся крестовины	58
Лабораторная работа № 4.2. Определение момента инерции крестовины при различном расположении грузов	66
Лабораторная работа № 5.1. Исследование колебаний физического маятника	75
Приложение 1. Оформление отчета по лабораторной работе	83
Приложение 2. Правила построения графиков	84
Приложение 3. Определение наклона прямой на графике .	89
Приложение 4. Правила представления результатов измерений	91
Приложение 5. Справочные материалы	96

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Кафедра Физики как общеобразовательная кафедра университета обеспечивает преподавание курса общей физики по двум (стандартной и расширенной) учебным программам в количестве 324 и 500 аудиторных часов для всех дневных факультетов, а также заочного и вечернего отделений. Лекции, практические и лабораторные занятия проводятся в течение 1-4 семестров на 1 и 2 курсах и заканчиваются сдачей зачетов и экзаменов в конце каждого семестра. Также на кафедре физики разработаны и реализуются специализированные дисциплины для студентов старших курсов – физика низких температур, биофизика, специальные и дополнительные главы физики.

Кафедра оснащена учебно-лабораторным оборудованием по всем разделам физики и имеет, помимо традиционных, специализированные компьютеризированные учебные лаборатории по электромагнетизму, колебательным процессам, волновой и квантовой оптике, физике низких температур.

В 2011 г. в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 18.08.2011 г. № 2209 произошло объединение Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) и Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ). После реорганизации в структуре Университета ИТМО с 01.01.2012 г. по 31.08.2015 г. функционировали две кафедры физики: 1) физики-1, заведующий д.т.н., профессор Стафеев Сергей Константинович; 2) физики-2, заведующий д.т.н., профессор Баранов Игорь Владимирович. С 01.09.2015 г. с целью оптимизации образовательного процесса вышеуказанные кафедры объединены в единую кафедру Физики.

Учитывая богатую и плодотворную историю педагогической и научной работы кафедр физики Университета ИТМО и СПбГУНиПТ, ниже

представлена краткая историческая справка об их развитии образовательной и научной деятельности.

Кафедра физики Университета ИТМО (1930-2011 гг.).

Преподавание физики как учебной дисциплины велось в Ремесленном училище цесаревича Николая всегда с момента его создания. Механико-оптическое и часовое отделение, а затем — Техникум точной механики и оптики имели в своем составе Физический кабинет. Преподаванию дисциплины Физика для учащихся всегда уделялось большое внимание. В 1930 году при организации вуза — Ленинградского института точной механики и оптики — была организована кафедра Физики как одна из общеобразовательных кафедр.

Организатором и первым заведующим кафедрой Физики явился профессор А.П. Ющенко. Затем в довоенные годы кафедру возглавляли: профессора В.Ф. Трояновский, Л.С. Полак. С 1935 года кафедру возглавил известный специалист в области рентгенометрии профессор И.В. Поройков.

В эвакуации в г. Черепаново Новосибирской области кафедру Физики возглавил известный ученый, сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ), занимавшийся дозиметрией и метрологией рентгеновских лучей, профессор К.К. Аглинцев.

С 1945 года кафедру Физики возглавил крупный специалист в области рентгенографии и физики твердого тела профессор Д.Б. Гогоберидзе. В 1946 году профессор Д.Б. Гогоберидзе стал первым деканом нового Инженерно-физического факультета.

Во второй половине 1940-ых годов на кафедре работал выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент Академии наук СССР Я.И. Френкель. Впоследствии кафедру Физики возглавляли: основоположник теплофизической школы ЛИТМО профессор Г.М. Кондратьев, профессор Н.А. Толстой, доцент С.В. Андреев, доцент А.Ф. Бегункова, профессор А.Я. Вяткин и профессор Н.А. Ярышев.

В течение 16 лет с 1957 по 1973 г. под руководством доктора физико-математических наук, профессора А.Я. Вяткина на кафедре было сформулировано научное направление по исследованию физики взаимодействия электронных пучков с веществом.

С 1973 года на кафедре под руководством профессора Н.А. Ярышева получили развитие научные исследования в области теплофизики, в частности, изучение нестационарной теплопроводности и теплотрии.

В 1987 году сотрудником кафедры стал С.А. Козлов (ныне декан факультета фотоники и оптоинформатики), Лауреат премии Ленинского комсомола по науке и технике, в 1998 году им была открыта лаборатория волновых процессов.

С конца XX века на кафедре проводится комплексная работа по совершенствованию всего учебного процесса, включая создание фронтальных компьютеризированных учебных лабораторий, банков контроля и проверки усвоения знаний, подготовку программно-методического обеспечения по дистанционному обучению студентов через компьютерные сети RUNNET и INTERNET. В этих учебно- и научно-методических направлениях деятельности кафедры принимали активное участие ведущие сотрудники кафедры доценты С.К. Стафеев (ныне профессор, декан естественнонаучного факультета), Ю.Л. Колесников (ныне профессор, проректор по учебно-организационной и административной деятельности), А.В. Смирнов, А.А. Королев, Г.Л. Башнина, ст.преподаватель С.А. Курашова.

С 2000 по 2015 годы кафедрой заведовал профессор, декан естественнонаучного факультета С.К. Стафеев. Под его руководством было сформировано научное направление, связанное с оптическими методами неразрушающего контроля, сотрудники кафедры А.А. Зинчик, Я.А. Музыченко подготовили и защитили кандидатские диссертации. С.К.Стафеев является организатором и научным руководителем первой в России интерактивной образовательной экспозиция "Музей оптики", созданной в рамках инновационной образовательной программы Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Расположена экспозиция на стрелке Васильевского острова, на первом этаже бывшего дома купца Елисеева. Знакомит с широким кругом применений оптических и оптико-информационных технологий, стимулирует дальнейшее изучение оптики. Главная цель Музея оптики — не только произвести впечатление, но и помочь в обучении школьникам и студентам профильных вузов. Для этого действуют залы практикумов и демонстраций.

Также С.К. Стафеев является куратором выставки Magic of light (Магия света) проходящей с России в рамках в рамках международного Года света, проводимого в 2015 г. в соответствии с решением Генеральной Ассамблеи ООН.

Кафедра физики СПбГУНиПТ (1931-2011 гг.).

В составе Университета низкотемпературных и пищевых технологий кафедра физики существовала с момента его основания в 1931 г. и обеспечивала фундаментальную общенаучную подготовку инженеров по всем специальностям.

Кафедрой руководили известные в СССР и России ученые, авторы многочисленных научных работ, монографий, учебников и учебных пособий по физике: доцент А.Н. Святозаров (1931 – 1942 гг.), профессор Л.М. Розенфельд (1942-1949 гг.), доцент Е.А. Штрауф (1949-1959 гг.), до-

цент К.В. Струве (1960-1968 гг.), профессор Н.В. Солнцев (1969-1975 гг.), заслуженный деятель науки РФ профессор Е.С. Платунов (1975-2002 гг.), профессор С.Е. Буравой (2002-2010 гг.), профессор И.В. Баранов (2010-2011 гг.).

В 1976-1985 гг. по инициативе заведующего кафедрой Е.С. Платунова коллективом кафедры была осуществлена коренная реконструкция учебно-лабораторной базы. Была переосмыслена логика проведения лабораторных и практических занятий и их связь с лекционной теоретической частью курса. В основу реорганизации была положена идея системного объединения всех видов занятий в логически обоснованную схему фронтального обучения «лекция – практическое занятие – лабораторная работа». Было создано 5 оригинальных учебных лабораторий стендового типа, охватывающих основные разделы курса: 1) Лаборатория физической механики (авторы - профессор Е.С. Платунов, доценты В.В. Курепин, З.В. Сигалова, старший преподаватель Л.В. Соколова); 2) Лаборатория термодинамики и молекулярной физики (Е.С. Платунов, В.В. Курепин, З.В. Сигалова); 3) Лаборатория электромагнетизма (доценты Д.Ю. Иванов, Э.Л. Китанина, А.Ф. Костко, С.М. Бунин); 4) Лаборатория оптики и атомной физики (доценты Л.С. Крайнова, С.Е. Буравой, В.А. Самолетов, преподаватели В.А. Павлов, В.А. Рыков); 5) Лаборатория физики твердого тела (доцент В.И. Соловьев, профессор Н.В. Солнцев, доцент В.М. Козин).

Каждая лаборатория имеет в своем составе 15 стендов, рассчитанных на проведение от 10 до 20 различных лабораторных работ по всем основным темам соответствующего раздела курса. Многие лабораторные работы отличаются оригинальным содержанием и не имеют аналогов в других учебных заведениях. Стенды оснащены современными приборами (цифровыми вольтметрами, лазерами, монохроматорами и т. п.).

Преподавателями кафедры был выполнен большой объем методической работы: составлено и издано около 100 новых оригинальных методических указаний по выполнению лабораторных работ, В.В. Курепиным, И.В. Барановым и В.Е. Куцаковой разработано пособие по оценке погрешностей в лабораторных работах, выдержавшее более 5 изданий.

В 1995-2005 г.г. профессором Е.С. Платуновым подготовлено и дважды издано учебное пособие по курсу общей физики в четырех томах общим объемом около 80 печ. листов.

В 2002 – 2006 гг. для студентов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур», и магистров всех специальностей создана не имеющая аналогов учебно-исследовательская лаборатория «Физика низких температур» (авторы проф. Е.С. Платунов, проф. И.В. Баранов, проф. В.В. Курепин, доценты В.М. Козин, С.С. Прошкин). Авторским коллективом (Е.С. Платунов, И.В. Баранов, Е.В. Тамбулатова,

А.Е. Платунов) издано учебное пособие для этой лаборатории с аналогичным названием. Лаборатория оснащена 15 автоматизированными стендами каждый из которых позволяет выполнить 13 лабораторных работ по изучению физических свойств веществ в области температур от минус 196 °С до 100 °С.

В 2002 – 2004 гг. преподавателями кафедры С.С. Прошкиным, Н.В. Нименским, В.А. Самолетовым подготовлено и издано учебное пособие «Сборник задач» с методическими указаниями и примерами решения. Сборник содержит около 1700 задач в трех книгах по разделам «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика и электромагнитные волны», «Квантовая физика».

Сотрудниками кафедры (проф. Е.С. Платунов, проф. В.А. Самолетов, проф. С.Е. Буравой) подготовлен и дважды издан словарь-справочник «Физика», объемом 40 печ. листов. Доцентом С.С. Прошкиным подготовлено и издано в 2009 году учебное пособие «Физика. История и развитие» объемом около 40 печатных листов для студентов, обучающихся по специальности «Экономика и менеджмент», а также аспирантов и магистров всех специальностей.

На кафедре физики под руководством профессора Е.С. Платунова к началу 80-х годов прошлого столетия сложилась оригинальная самостоятельная научная школа теплофизиков-прибористов, получившая мировое признание и известность.

В 1977 г. при кафедре была открыта Отраслевая научная лаборатория динамических методов теплофизических измерений и приборов. Лаборатория стала базой для научного роста аспирантов и инженеров, формирования нового поколения преподавателей кафедры.

Совместно с ГСКБ теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП) за 15 лет функционирования лаборатории было создано более двадцати различных образцов приборов для изучения теплофизических свойств веществ, охватывающих в совокупности диапазон температур от 4,2 до 1200 К. Некоторые из них были приняты к промышленному производству и выпускались серийно на опытном производстве ГСКБ ТФП и на одном из заводов Казахстана вплоть до распада СССР в 1991 году. По своей методической сути эти разработки значительно превышали уровень таких известных фирм, как «Dynatech» (США), «Feuotron» (ФРГ), «Setaram» (Франция). Созданные приборы обладали большой производительностью, позволяя за один эксперимент изучать температурную зависимость измеряемых параметров (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность). В Советском Союзе основной объем информации о теплофизических свойствах твердых веществ в области от 200 до 700 К был получен на приборах, разработанных научной школой профессора Е.С. Платунова.

Во многих научных и учебных лабораториях стран СНГ эти приборы успешно функционируют и в настоящее время.

По данной научной тематике к 1992 году было опубликовано свыше 150 статей, получено 40 авторских свидетельств на изобретения. Разработаны оригинальные методы исследования теплофизических свойств в области криогенных температур (от 4,2 до 300 К). Созданы средства измерения, не требовавшие специальных криостатирующих устройств, экспрессные по своей сути, что означало значительный прорыв в области техники низкотемпературного теплофизического эксперимента.

Сотрудниками кафедры проведены оригинальные исследования в области создания методов и средств неразрушающего контроля тепловых свойств материалов и изделий. Эти разработки стали основой кандидатских диссертаций Е.А. Белова и Г.Я. Соколова.

В 1976 г. на кафедре развивалась научное направление, связанное с поиском методов построения уравнений состояния и расчетом свойств индивидуальных веществ идеальных газов, имеющих широкое применение в холодильной и криогенной технике. По результатам этих исследований были защищены 4 кандидатских и 2 докторские диссертации, опубликовано более 70 научных статей в отечественных и зарубежных журналах.

С 1992 года ведется поиск новых методов определения тепловых и влажностных характеристик разнообразных групп дисперсных влагосодержащих материалов в условиях их промерзания и размораживания. В настоящее время создан комплекс автоматизированных приборов, позволяющих изучать кинетику изменения энтальпии, дифференциальной теплоты плавления, теплопроводности и влагосодержания пищевых материалов животного и растительного происхождения в области температур от минус 30 °С до 40 °С, в условиях замораживания и размораживания продуктов, разработаны приборы, предназначенных для измерения интенсивности внутренних тепловых источников, непрерывно действующих в пищевых продуктах в условиях их производства и хранения.

При кафедре под руководством профессоров Е.С. Платунова и И.В. Баранова с 2008 г. функционирует научная лаборатория «Теплофизические измерения и приборы». В лаборатории создан комплекс методов автоматизированных приборов для изучения теплопроводности, теплоемкости, теплоты структурных и фазовых переходов в различных веществах, в том числе в процессах замораживания, оттайки, исследуются свойства пищевых продуктов и конструкционных материалов холодильной и криогенной техники.

Коллективом преподавателей кафедры по этому направлению подготовлена к изданию фундаментальная монография «Теплофизические измерения», обобщающая исследования авторов за последние 30 лет.

С конца 60-х годов на кафедре проводятся экспериментальные и теоретические исследования фазовых переходов и критических явлений. Начало этим работам было положено исследованием гравитационного эффекта вблизи критической точки парообразования, проведенным доцентом Д.Ю. Ивановым. В 80-ые годы группой сотрудников кафедры были проведены работы по корреляционной спектроскопии многократно рассеянного света. По результатам этих исследований опубликована серия научных статей, сделано более 10 докладов на конференциях и защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 90-х годах совместно с одним из ведущих университетов Франции проводились исследования процессов нуклеации наночастиц в растворах. Совокупные результаты исследований критических явлений легли в основу докторской диссертации доцента Д.Ю. Ивановым (2001 г.) и его монографии «Критическое поведение неидеализированных систем».

Научные исследования в области фазовых переходов, предпереходных явлений и рассеяния света в сложных жидких системах успешно развивает доцент, кандидат физико-математических наук А.Ф. Костко. Во время многолетней стажировки в ведущих университетах США А.Ф. Костко совместно с американскими коллегами методами рассеяния света проводил исследования растворов полимеров, водных растворов электролитов, биогелей и лиотропных хромонических жидких кристаллов в широком диапазоне температур и давлений. Результаты этих исследований, проведенных А.Ф. Костко после 2000 года, опубликованы в 13 статьях в ведущих международных научных журналах по физике и химии, а также доложены на 15 международных конференциях.

На сегодня кафедра Физики – одна из крупнейших в университете – представляет собой динамично развивающийся творческий коллектив, способный решать масштабные задачи развития и подготовки инженерных и научно-педагогических кадров. В связи с реорганизацией и объединением кафедр с 1 сентября 2015 года кафедра Физики находится под руководством доктора технических наук, профессора Игоря Владимировича Баранова.

С 2010 г. Игорь Владимирович является членом докторского диссертационного Совета Д 212.234.01. Им опубликовано 57 научных и 7 учебно-методических работ. За последние 3 года издано: 21 научная работа и 2 учебно-методических работы, в том числе в соавторстве Барановым И.В. в 2010 г. издано учебное пособие “Теплофизические измерения” с грифом УМО по политехническому образованию. Баранов И.В. выступал с докладами на 25 международных и всероссийских научных конференциях. Баранов И.В. является с 2008 г. академиком Международной академии холо-

да. Исполняет обязанности заместителя главного редактора научно-технического журнала "Вестник МАХ".

В настоящее время коллектив кафедры включает в себя 30 преподавателей и 10 учебно-вспомогательного персонала.

Под руководством профессора кафедры физики ИТМО Чирцова А.С. и доцента Демидова В.И. из Университета Западной Вирджинии работает Международная лаборатория «Нелокальная плазма в нанотехнологиях и медицине, которая ведет исследования по следующим направлениям:

- Исследование параметров нелокальной плазмы модифицированного короткого газового разряда постоянного тока с накаливаемым катодом
- Плазмохимическое моделирование разрядов в газах SF₆ и O₂
- Изучение особенностей дрейфа микрочастиц в плазме, обусловленных спецификой функции распределения электронов по энергиям в нелокальной плазме
- Моделирование разряда с использованием аналитических методов

Силами профессора А.С.Чирцова и старшего преподавателя С.А.Курашовой создаются on-line курсы по физике, которые размещены в Lectorium на сайте Университета ИТМО.

Под руководством С.К.Стафеева на кафедре Физики в 2016 году открыта программа подготовки магистров по уникальному в России направлению Science communications.

Баранов Игорь Владимирович
Самолетов Владимир Александрович

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МЕХАНИКЕ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49**