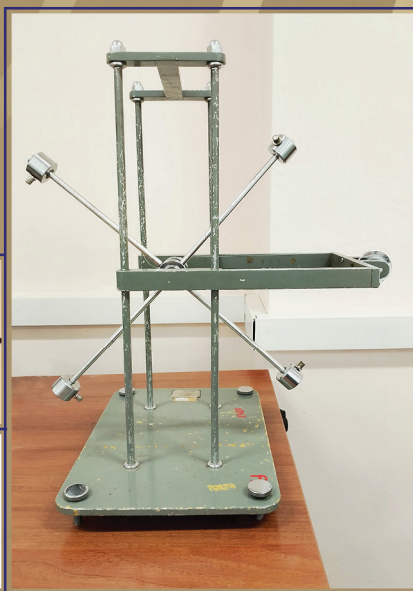
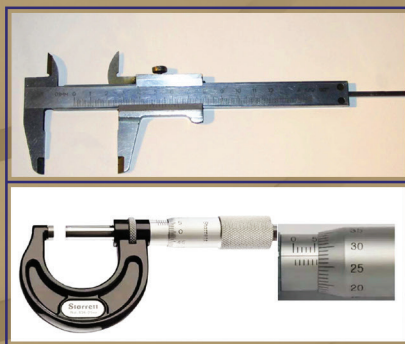


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

В.А. Сарафанова, С.Н. Потемкина, И.С. Ясников

ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА. МЕХАНИКА

Лабораторный
практикум



© Сарафанова В.А., Потемкина С.Н., Ясников И.С., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

ISBN 978-5-8259-1618-7

УДК 531(075.8)
ББК 22.2я73

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК» Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии
им. Н.И. Вавилова *А.В. Розанов*;
д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика» Тольяттинского государственного университета
А.П. Воленко.

Сарафанова, В.А. *Общая и экспериментальная физика. Механика : лабораторный практикум / В.А. Сарафанова, С.Н. Потемкина, И.С. Ясников. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2024. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1618-7.*

В лабораторном практикуме представлены методические указания к 10 лабораторным работам по разделу «Общая и экспериментальная физика. Механика». Даются рекомендации по самостоятельной подготовке к лабораторным работам и их выполнению. Предлагаются вопросы для самоконтроля.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование» направленности «Математика и физика» в Тольяттинском государственном университете.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Сарафанова В.А., Потемкина С.Н.,
Ясников И.С., 2024
© ФГБОУ «Тольяттинский
государственный университет», 2024

Учебное издание

***Сарафанова Валентина Александровна
Потемкина Светлана Николаевна
Ясников Игорь Станиславович***

ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА. МЕХАНИКА

Редактор *Т.В. Антонова*

Технический редактор *Т.В. Антонова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение
от freepik на сайте ru.freepik.com

Дата подписания к использованию 06.03.2024.

Объем издания 3 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-33-23.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Предисловие	5
Вводное занятие. Методика обработки результатов измерений физических величин	6
Лабораторная работа М1. Оценка измеряемой физической величины с помощью доверительного интервала	20
Лабораторная работа М2. Обработка результатов косвенных измерений объема тела	26
Лабораторная работа М3. Изучение кинематики поступательного движения с помощью машины Атвуда	34
Лабораторная работа М4. Изучение кинематики вращательного движения с помощью маятника Обербека	39
Лабораторная работа М5. Изучение движения центра инерции механической системы	46
Лабораторная работа М6. Проверка второго закона Ньютона	54
Лабораторная работа М7. Изучение закона сохранения полной механической энергии	63
Лабораторная работа М8. Определение зависимости момента инерции тела от распределения его массы относительно оси вращения	71
Лабораторная работа М9. Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний	77
Лабораторная работа М10. Изучение динамики вращательного движения	83
Библиографический список	90
Приложение 1	91
Приложение 2	94

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основной задачей высшего образования является формирование у студентов научного мировоззрения. Эту задачу решают все дисциплины, изучаемые в высшей школе. Однако ведущая роль принадлежит фундаментальным дисциплинам, к числу которых относится физика. Роль физики в становлении инженера, создателя современной техники и современных технологий, чрезвычайно велика.

Лабораторный практикум по физике помогает глубже осознать и усвоить основные физические закономерности, приобрести навыки самостоятельной экспериментальной работы, ознакомиться с измерительной аппаратурой и методами физических измерений, научиться получать, записывать и обрабатывать результаты измерений.

В физической лаборатории студент должен получить элементарные навыки экспериментальной работы. Он должен научиться самостоятельно воспроизводить и анализировать основные физические законы, делать правильные выводы из сопоставления теории и эксперимента; выделять главное, существенное; научиться делать качественные выводы при переходе к предельным условиям.

Цель настоящего учебно-методического пособия — оказать помощь студентам педагогических специальностей в изучении курса физики.

В соответствии с программой курса физики для педагогических специальностей высших учебных заведений России данный лабораторный практикум содержит раздел «Механика».

Предлагаемый лабораторный практикум является отражением многолетней работы учебной физической лаборатории при Тольяттинском государственном университете и составлен на базе лабораторных работ, представленных в ней. Авторы выражают благодарность всему коллективу кафедры «Общая и теоретическая физика» за создание физической лаборатории и постановку отдельных лабораторных работ.

Вводное занятие

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: ознакомление с правилами поведения в лаборатории механики, правилами по технике безопасности, пожарной безопасности; изучение методики обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.

Общие сведения

Правила техники безопасности в лаборатории механики

Приступать к выполнению физического практикума можно только после ознакомления с правилами по технике безопасности в физической лаборатории.

Инструктаж по технике безопасности в конкретной физической лаборатории проводит преподаватель физики или лаборант, ответственный за данную лабораторию. Студенты, прослушавшие инструктаж, обязуются соблюдать правила по технике безопасности, о чем расписываются в соответствующем журнале.

В лаборатории всегда должны поддерживаться чистота и порядок.

Входить в лабораторию можно только с разрешения лаборанта.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, следует ознакомиться с описанием работы, а во время ее выполнения быть внимательным и строго соблюдать правила техники безопасности.

Выполнение многих лабораторных работ связано с применением различных источников электрической энергии. Поражение электрическим током со смертельным исходом может произойти и при низком напряжении в цепи. Тщательно следите за исправностью изоляции проводов и оборудования. Немедленно сообщайте о замеченных неисправностях лаборанту.

Только преподаватель или лаборант может включать силовой рубильник в лаборатории.

Устранение неисправностей в лабораторной установке может производить только лаборант при отключенном источнике питания.

Уходя от рабочего места во время занятий, выключайте источники питания.

В ряде работ применяются стеклянные детали. Стекло хрупкое и требует осторожного обращения. Избегайте поломок, ударов, падений стеклянных деталей, так как это может привести к травме.

Обращайтесь осторожно с тяжелыми металлическими предметами, которые применяются в некоторых работах по механике.

К выполнению лабораторной работы студент допускается только при наличии бланка отчета о выполняемой лабораторной работе и подписи преподавателя, проверившего его предварительную подготовку.

При нарушении правил техники безопасности студент отстраняется от работы в лаборатории и допускается к ней только после повторного изучения правил техники безопасности и собеседования с преподавателем.

Лабораторный практикум и порядок его выполнения

Лабораторный физический практикум представляет собой совокупность лабораторных работ, которые студент выполняет на лабораторных занятиях.

Каждое лабораторное занятие должно включать следующие этапы:

1. Получение допуска к лабораторной работе.
2. Проведение эксперимента.
3. Обработка результатов эксперимента.
4. Получение зачета по теории.
5. Сдача оформленного отчета о лабораторной работе.

К лабораторному занятию студент готовится самостоятельно. Ему необходимо проработать методические указания к предстоящей лабораторной работе и теоретический материал по данной теме, используя конспект лекций, учебники и учебные пособия. Студент должен составить бланк отчета по лабораторной работе и приготовить ответы на вопросы для самоконтроля (возможно письменно) для получения зачета по теории.

В начале лабораторного занятия студент должен получить допуск к лабораторной работе. Для этого студенту необходимо

- знать: цель работы, описание установки и методики измерений исследуемых физических величин;
- представить преподавателю заготовленный бланк отчета.

Преподаватель после опроса студента на титульном листе бланка отчета ставит подпись в графе «К работе допущен».

После получения допуска студент выполняет необходимые измерения. Преподаватель или лаборант, в присутствии которого проводились измерения, проверяет их и ставит рядом с измерениями свою подпись и дату.

Далее студент обрабатывает результаты эксперимента: делает необходимые расчеты, строит графики, пишет вывод по лабораторной работе. После проверки полностью оформленного бланка отчета о лабораторной работе преподаватель на титульном листе бланка отчета ставит подпись в графе «Работа выполнена».

Затем преподаватель проводит теоретический опрос студента и при положительных ответах ставит подпись в графе «Теория зачтена».

Когда на титульном листе отчета стоят три подписи преподавателя, он проставляет в своем журнале и на образовательном портале рейтинговый балл за выполненную лабораторную работу.

Если студент выполняет лабораторную работу с использованием персонального компьютера (ПК), то в начале занятия он должен пройти тест допуска-защиты. При 60 % правильных ответов на вопросы теста он допускается к выполнению эксперимента. После проведенных на ПК расчетов преподаватель проверяет работу. Если в бланке отчета отсутствуют красные поля, то студент переносит расчеты и графики в свой бланк отчета и сдает преподавателю.

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схему установки.
5. Расчетные формулы.
6. Результаты измерений.

7. Расчеты, графики.

8. Вывод.

Пример оформления бланка отчета по лабораторной работе М1 приведен в прил. 1.

Измерения физических величин. Обработка результатов измерений

Физика является наукой опытной. Она исследует различные закономерные связи в природе. Закономерные связи между наблюдаемыми явлениями формулируются в виде физических законов, которые, как правило, записываются в виде равенств, связывающих различные физические величины.

Физическая величина — характеристика одного из свойств физического объекта, общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта.

Нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств называется **измерением**.

Результат измерения физической величины состоит из двух частей: численного значения и единиц измерения. Например, 5,2 м; 9,81 м/с².

По способу получения числового значения физической величины различают прямые и косвенные измерения. При **прямом измерении** значение физической величины отсчитывают по показаниям средства измерения (измерение промежутка времени — секундомером, температуры — термометром, длины — масштабной линейкой и т. д.). Однако прямые измерения не всегда возможны. При **косвенном измерении** значение физической величины находят по известной зависимости между ней и непосредственно измеренными величинами (например, нахождение плотности тела по его массе и объему).

Любая физическая величина обладает **истинным значением**, т. е. значением, идеально отражающим в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объекта.

Как правило, при любых измерениях получают не истинное значение измеряемой величины, а лишь ее приближенное значение. Это происходит в силу ряда объективных (несовершенство измерительной аппаратуры, неполнота знаний о наблюдаемом явлении) и субъективных причин (несовершенство органов чувств экспериментатора). Точные измерения можно произвести только в том случае, если исследуемая величина имеет дискретный характер: число атомов в молекуле; число электронов в атоме.

Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется **погрешностью измерения**. По форме выражения различают абсолютные и относительные погрешности.

Абсолютная погрешность измерения — это разность между результатом наблюдения и истинным значением измеряемой величины: $\Delta a = a - a_{\text{ист}}$. Она выражается в единицах физической величины.

Относительная погрешность измерения — это сопоставление величины погрешности с истинным значением измеряемой величины: $\delta = \frac{\Delta a}{a_{\text{ист}}} \cdot 100\%$.

Значение физической величины, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него, называется **действительным значением** физической величины. В качестве **действительного значения** используется среднее арифметическое $\langle a \rangle$, вычисленное из серии результатов наблюдения, полученных с одинаковой точностью:

$\langle a \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$. Поэтому в качестве абсолютной погрешности наблюдения используют величину: $\Delta a = a - \langle a \rangle$, а в качестве относительной погрешности: $\delta = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%$.

Оценить погрешность измеряемой величины — значит указать интервал ($\langle a \rangle - \Delta a$; $\langle a \rangle + \Delta a$), внутри которого с заданной вероятностью P заключено истинное значение измеряемой величины. Такой интервал называется **доверительным**. При многократных измерениях доверительную вероятность принимают равной $P = 0,95$.

Классификация погрешностей

Погрешности измерения классифицируют по ряду признаков.

По **форме выражения** различают абсолютные и относительные погрешности.

По **характеру происхождения** погрешности делятся на методические, инструментальные и личные.

По **своим свойствам** погрешности измерения разделяются на систематические, случайные и грубые погрешности.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины с помощью одного и того же измерительного прибора. Сюда относятся погрешности, обусловленные неисправностью или неправильной установкой измерительного прибора, неточностью метода измерения, постоянным и односторонним внешним воздействием (смещена нулевая точка прибора, используются неточные гири, происходит неравномерное нагревание и т. п.). Обнаружить систематическую ошибку во многих случаях нелегко. Для этого требуется тщательный анализ метода измерения, выполнение измерений различными приборами и разными методами, измерение одним методом, но в разных условиях и т. п. Обнаруженная и оцененная систематическая погрешность исключается из результата измерения путем введения поправки.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, которая случайным путем изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности вызваны большим количеством факторов — как субъективных, так и объективных: несовершенством органов чувств человека, внешними условиями и т. п. Случайные погрешности оценивают по данным многократных наблюдений методами математической статистики.

Грубая погрешность — это погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Внешним признаком результата, содержащего грубую погрешность, является его резкое отличие от результатов остальных наблюдений. Такой результат должен быть обязательно исключен из результатов измерений.

Промехи — следствие неправильных действий экспериментатора: описка при записи результатов измерений, неправильно снятое

показание прибора и т. п. Промахи всегда следует исключать из рассмотрения.

Обработка результатов прямых измерений физической величины

1. Погрешность прибора

В случае однократного измерения или если в результате наблюдений получается ряд совершенно одинаковых значений измеряемой величины, абсолютная погрешность физической величины определяется по прибору $\Delta a = \lambda$.

а) Погрешность λ , которую вносит прибор, равна половине цены деления его шкалы: $\lambda = \frac{1}{2}$ ц. д. или целому делению $\lambda =$ ц. д., если положение указателя прибора трудно различимо в пределах одного деления.

б) При использовании приборов, содержащих дополнительную уточняющую шкалу нониуса, погрешность прибора берется равной цене деления шкалы нониуса: $\lambda =$ ц. д.

в) При использовании электроизмерительных приборов погрешность прибора рассчитывается по его классу точности: $\lambda = \frac{\gamma \cdot A}{100}$, где γ – класс точности прибора, A – предел измерения. Предел измерения A означает: для приборов с односторонней шкалой – верхний предел измерения; для приборов с двухсторонней шкалой – сумма пределов измерений по левой и правой частям шкалы.

2. Многократное измерение – измерение физической величины, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, полученных при идентичных условиях.

Для определения абсолютной погрешности Δa физической величины, полученной в результате прямых многократных измерений, применяется метод Стьюдента.

Перед применением метода Стьюдента следует удалить из результатов наблюдений те значения, которые содержат грубую погрешность.

Методика исключения грубых погрешностей:

1. Произвести ранжирование результатов наблюдений, т. е. расположить их в возрастающем порядке: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$.

2. Найти размах данной серии результатов, т. е. разность между наибольшим и наименьшим значениями данной серии: $R = a_N - a_1$.
3. Рассчитать отношения: $Q_1 = \frac{a_2 - a_1}{R}$; $Q_2 = \frac{a_N - a_{N-1}}{R}$.
4. Определить табличное значение Q_T для данного числа измерений N и доверительной вероятности P (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты для обработки результатов прямых измерений

Число наблюдений N	Доверительная вероятность $P = 0,95$	
	Q_T	Коэффициент Стьюдента $t_{ст}$
3	0,941	4,30
4	0,765	3,18
5	0,642	2,78
6	0,560	2,57
7	0,507	2,45
8	0,468	2,37
9	0,437	2,31
10	0,412	2,26

5. Сравнить рассчитанные значения Q_1 , Q_2 с табличным значением Q_T и сделать вывод. Если полученное значение больше табличного $Q_i > Q_T$, то результат измерения, в котором содержится грубая погрешность, надо исключить из дальнейшей обработки.

Обработка результатов прямых многократных измерений по методу Стьюдента:

1. Занести в таблицу результаты наблюдений.

№	a_i	$\Delta a_i = a_i - \langle a \rangle$	$(\Delta a_i)^2$
1			
2			
...			1
N			

$$\langle a \rangle =$$

$$\Sigma(\Delta a_i)^2 =$$

2. Рассчитать среднее арифметическое значение для данной серии измерений $\langle a \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$.

3. Найти отклонение каждого из результатов измерений от среднего значения $\Delta a_i = a_i - \langle a \rangle$.

4. Найти квадрат отклонений от среднего значения для каждого из результатов измерений $\sum (\Delta a_i)^2$.

5. Определить оценку среднего квадратичного отклонения результата измерения: $S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{N(N-1)}}$, где N – число измерений.

6. Найти по табл. 1 коэффициент Стьюдента для данного числа наблюдений.

7. Вычислить случайную погрешность: $\alpha = t_{\text{ст}} \cdot S$.

8. Записать погрешность используемого прибора λ .

9. Рассчитать абсолютную погрешность: $\Delta a = \alpha + \lambda$.

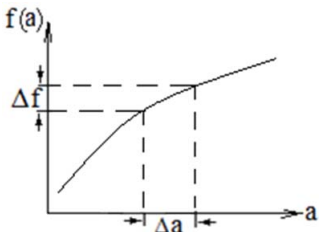
3. Для констант абсолютную погрешность определяют как разность данного приближенного значения и более точного. Например, для числа $\pi = 3,14$ более точное значение 3,142, тогда $\Delta \pi = 3,142 - 3,14 = 0,002$.

Если более точное значение неизвестно, то абсолютная погрешность принимается равной половине единицы разряда последней значащей цифры взятого числа. Например:

- для значения ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ абсолютная погрешность $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$;
- для значения гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ абсолютная погрешность $G = 0,005 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

4. Для величин, имеющих дискретный характер, например, число атомов в молекуле, число электронов в атоме, абсолютная погрешность равна нулю: $\Delta a = 0$.

5. Для величины, определяемой из графика, абсолютная погрешность также находится из графика как изменение ординаты, вызванное изменением абсциссы на Δa : $\Delta f(a) = f(a + \Delta a) - f(a)$.



Обработка результатов косвенных измерений физической величины

При косвенных измерениях искомая величина является функцией одного или нескольких аргументов: $U = f(a, b, c, \dots)$. Величины a, b, c, \dots находятся непосредственно из эксперимента.

Сначала находят среднее значение и абсолютную погрешность каждого аргумента. Затем рассчитывают среднее значение искомой величины: $\langle U \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots)$.

Величину абсолютной погрешности вычисляют по формуле

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \dots}$$

Запишем эту формулу для нескольких частных случаев:

$$1) U = a \pm b \pm c \pm \dots \quad \Delta U = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \dots}$$

$$2) U = a^k \cdot b^l \cdot c^m \quad \Delta U = \langle U \rangle \sqrt{\left(\frac{k \Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{l \Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(\frac{m \Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}.$$

Тем, кто еще не знаком с методами дифференцирования или слабо владеет ими, следует каждую конкретную формулу привести к одному из рассмотренных частных случаев, введя промежуточные обозначения.

Пример. Необходимо рассчитать абсолютную погрешность измерения ускорения свободного падения, которое задается формулой:

$$g = \frac{2\pi^2(l_1 - l_2)}{T_1^2 - T_2^2}.$$

Упростим данную формулу, введя обозначения

$$A = l_1 - l_2; B = T_1^2; C = T_2^2; D = B - C.$$

Тогда расчетная формула будет

$$\text{иметь вид: } g = \frac{4\pi^2 A}{D}.$$

Воспользуемся частной формулой 2:

$$\Delta g = \langle g \rangle \sqrt{\left(\frac{2\Delta\pi}{\langle \pi \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{\langle A \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{\langle D \rangle}\right)^2}.$$

Согласно частной формуле 1:

$$\Delta A^2 = \Delta l_1^2 + \Delta l_2^2; \Delta D^2 = \Delta B^2 + \Delta C^2.$$

Согласно частной формуле 2:

$$\Delta B = 2T_1 \cdot \Delta T_1; \Delta C = 2T_2 \cdot \Delta T_2.$$

Подставив все эти выражения, получим окончательную формулу для расчета величины абсолютной погрешности:

$$\Delta g = \langle g \rangle \sqrt{\left(\frac{2\Delta\pi}{\langle\pi\rangle}\right)^2 + \frac{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2}{(l_1 - l_2)^2} + \frac{4\left((T_1\Delta T_1)^2 + (T_2\Delta T_2)^2\right)}{(T_1^2 - T_2^2)^2}}.$$

Для облегчения вычислений рекомендуется использовать формулы для вычисления погрешностей функций, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Формулы для вычисления погрешностей функций

№ п/п	Функция	Абсолютная погрешность	№ п/п	Функция	Абсолютная погрешность
1	x^k	$k < x >^{k-1} \Delta x$	7	$\frac{x}{1+x}$	$\frac{\Delta x}{(1 \pm < x >)^2}$
2	$\sqrt[k]{x}$	$\frac{\Delta x}{k \sqrt[k]{< x >^{k-1}}}$	8	$\frac{1}{x^k}$	$\frac{k \Delta x}{< x >^{k+1}}$
3	$\ln x$	$\frac{\Delta x}{< x >}$	9	$\sin kx$	$k \cos k < x > \cdot \Delta x$
4	e^{kx}	$ke^{k < x >} \Delta x$	10	$\cos kx$	$k \sin k < x > \cdot \Delta x$
5	$\lg x$	$0,43 \frac{\Delta x}{< x >}$	11	$\operatorname{tg} kx$	$\frac{k \Delta x}{\cos^2 k < x >}$
6	a^{kx}	$k \ln a \cdot a^{k < x >} \Delta x$	12	$\operatorname{ctg} kx$	$\frac{k \Delta x}{\sin^2 k < x >}$

Абсолютная погрешность аргумента тригонометрической функции выражается в радианах ($1^\circ = 1,745 \cdot 10^{-2}$ рад).

В лабораторных работах приведены формулы для расчета абсолютных погрешностей искомых функций.

Запись окончательного результата измерений

Окончательный результат измерения должен быть представлен в стандартной форме. Для этого:

1. Абсолютную погрешность измерения Δa округляют до первой значащей цифры. При наиболее точных измерениях или если первая значащая цифра в абсолютной погрешности единица, то абсолютную погрешность представляют в виде числа с двумя значащими цифрами.

2. Результат измерения $\langle a \rangle$ округляют до того разряда, до которого округлена абсолютная погрешность.

3. Результат измерения должен содержать до запятой одну значащую цифру и быть выражен в системе единиц измерения СИ.

Например:

$$\Delta a = 0,000381 \approx 0,0004 \text{ см};$$

$$\langle a \rangle = 0,06243 \approx 0,0624 \text{ см};$$

$$a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) = (6,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{ см} = (6,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Правила округления

При записи результатов измерений, а также при их обработке, округление результата проводится согласно следующим правилам:

1. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не изменяется.

2. Если старшая отбрасываемая цифра больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу.

3. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она чётная, и, увеличивают на 1, если она нечетная. Например: число 2,125 при сохранении двух значащих цифр округляют до 2,12, а число 2,135 — до 2,14.

4. Из правил округления имеется исключение: *при округлении погрешности последняя сохраняемая цифра увеличивается на 1, если старшая сохраняемая цифра 3 или больше.*

Например, пусть $\langle h \rangle = 3,455 \text{ м}$, а $\Delta h = 0,043 \text{ м}$, тогда правильная запись окончательного результата выглядит так: $h = (3,46 \pm 0,05) \text{ м}$.

Построение графиков

1. Графики нужно строить на миллиметровой бумаге.
2. При построении графика следует заранее выбрать масштаб, нанести деления масштаба по осям координат. Значения независимого аргумента откладываются на оси абсцисс, а по оси ординат откладываются значения функции.
3. По координатным осям необходимо указать не только откладываемые величины, но и единицы измерения.
4. При выборе масштаба надо стремиться к тому, чтобы кривая занимала весь лист. Шкала для каждой переменной может начинаться не с нуля, а с наименьшего округленного значения и кончаться наибольшим значением.
5. После этого нанести на график экспериментальные точки. Вокруг каждой точки должен быть построен прямоугольник со сторонами, равными абсолютным погрешностям аргумента и функции.
6. Нанесенные чернилами экспериментальные точки соединяют между собой карандашом плавной кривой, без резких искривлений и углов.
7. Кривая должна охватывать как можно больше точек или проходить между ними так, чтобы по обе стороны от нее точки располагались равномерно.
8. Пользуясь кривой, можно производить интерполирование, т. е. находить значения искомой величины для таких значений аргумента, которые непосредственно не наблюдались.

Программа работы

1. Знакомство преподавателя со студентами.
2. Инструктаж по правилам поведения студентов в лаборатории, по технике безопасности и пожарной безопасности.
3. Ознакомление с порядком выполнения лабораторного практикума.
4. Ознакомление с системой оценки знаний студентов на лабораторном практикуме.
5. Изучение правил обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.

Порядок работы

1. Представление преподавателя и лаборанта. Их права, обязанности и требования к студентам.
2. Разбить студентов группы на маршруты для выполнения лабораторных работ.
3. Провести инструктаж студентов по технике безопасности и пожарной безопасности. Расписаться всем студентам и преподавателю в журнале по технике безопасности и пожарной безопасности.
4. Ознакомить студентов с порядком выполнения лабораторного практикума в лаборатории механики.
5. Ознакомить студентов с системой оценки знаний на лабораторном практикуме.
6. Изучение правил обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.

Лабораторная работа М1

ОЦЕНКА ИЗМЕРЯЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ С ПОМОЩЬЮ ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА

Цель работы: усвоить методику обработки результатов прямых измерений.

Приборы и инструменты: штангенциркуль, цилиндрическое тело.

Описание установки и метода измерений

Штангенциркуль служит для линейных измерений (рис. 1.1, 1.2). Он состоит из штанги 1, по которой свободно перемещается рамка 2. Цена деления шкалы 3 штанги $a_{\text{ш}} = 1$ мм. Нониус 7 – специальная шкала, дополняющая обычный масштаб и позволяющая повысить точность измерений в 10–20 раз. Точность шкалы нониуса рассчитывается по формуле: цена деления основной шкалы штанги разделить на количество штрихов нониуса: $\lambda = \frac{a_{\text{ш}}}{N}$. Величина λ называется погрешностью нониуса. Погрешность нониуса λ наносится на штангу прибора.

Штанга и нониус снабжены измерительными выступами (губками) 4, 5, расстояние между которыми изменяется при перемещении нониуса вдоль штанги. Винт 8 служит для фиксирования положения нониуса на штанге.

При измерениях штангенциркулем внешних размеров тело слегка зажимается между выступами 5. При этом нулевая отметка шкалы нониуса смещается относительно нулевой отметки шкалы штанги на величину длины l измеряемого тела. По шкале штанги отсчитывают целое число наименьших делений n до нулевой отметки шкалы нониуса. Далее смотрят, какая отметка шкалы нониуса m совпадает с некоторой отметкой шкалы штанги. Зная величины n и m , по формуле: $l = (n + \lambda m)$ определяют нужный размер тела.

Для проверки исправности штангенциркуля необходимо выступы 5 сдвинуть вплотную, при этом нулевые отметки шкал масштабной линейки и нониуса должны совпадать.

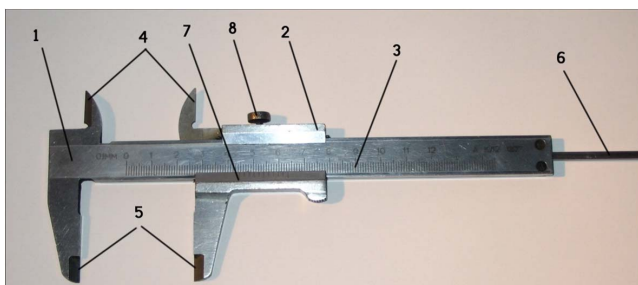


Рис. 1.1. Устройство штангенциркуля: 1 – штанга; 2 – подвижная рамка; 3 – шкала штанги; 4 – губки для внутренних измерений; 5 – губки для наружных измерений; 6 – глубиномер; 7 – нониус; 8 – зажимный винт для фиксации рамки

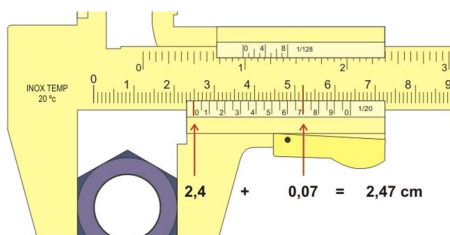


Рис. 1.2. Измерения штангенциркулем

Программа работы

1. Многократные измерения высоты цилиндрического тела.
2. Обработка результатов измерений высоты по методу Стьюдента.
3. Построение доверительного интервала для измеренной высоты цилиндрического тела.

Порядок работы

1. Ознакомиться с устройством штангенциркуля. Убедиться, что штангенциркуль исправен. Определить и записать погрешность штангенциркуля λ .
2. Поместить цилиндр между выступами 5 штангенциркуля, слегка сжать их и зафиксировать положение нониуса винтом 8. Произвести отсчет высоты цилиндрического тела.

3. Произвести 6–8 измерений высоты цилиндра, каждый раз меняя положение цилиндра относительно выступов штангенциркуля.

4. Исключить грубые погрешности из результатов измерений. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

1) произвести ранжирование результатов измерений (расположить их в возрастающем порядке): $h_1, h_2, h_3, \dots, h_N$;

2) найти размах (разность между наибольшим и наименьшим значениями измеряемой величины): $R = h_N - h_1$.

3) рассчитать отношения: $Q_1 = \frac{h_2 - h_1}{R}$; $Q_2 = \frac{h_N - h_{N-1}}{R}$;

4) определить для доверительной вероятности $P = 0,95$ и данного числа наблюдений N табличное значение Q_T (табл. 1);

5) сравнить Q_1, Q_2 с табличным значением Q_T и сделать вывод.

Если полученное значение больше табличного $Q_i > Q_T$, то результат измерения, в котором содержится грубая погрешность, надо исключить. Если $Q_i \leq Q_T$, то результат измерения не содержит грубую погрешность и участвует в дальнейшей обработке по методу Стьюдента.

5. Обработать результаты многократных измерений высоты цилиндрического тела по методу Стьюдента. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

1) занести в таблицу результаты наблюдений;

2) найти среднее значение высоты $\langle h \rangle$ и сумму квадратов отклонений каждого измерения от среднего значения $\Sigma(\Delta h_i)^2$;

3) определить оценку среднего квадратичного отклонения результата измерения: $S = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta h_i)^2}{N(N-1)}}$;

4) найти для доверительной вероятности $P = 0,95$ и данного числа наблюдений N коэффициент Стьюдента t_{ct} (табл. 1);

5) вычислить случайную погрешность: $\alpha = t_{ct} \cdot S$;

6) рассчитать абсолютную погрешность измерения высоты:

$$\Delta h = \alpha + \lambda;$$

7) рассчитать относительную погрешность измерения:

$$\delta = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} \cdot 100 \%$$

6. Записать окончательный результат измерения высоты:

$$h = (\langle h \rangle \pm \Delta h) \text{ м.}$$

7. Построить доверительный интервал для измеренной высоты цилиндрического тела.
8. Сделать вывод по лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Описать устройство штангенциркуля.
2. Как измерить штангенциркулем внешние размеры тела?
3. Как проверить исправность штангенциркуля?
4. Каков алгоритм исключения грубых погрешностей из результатов измерений?
5. Каков алгоритм обработки результатов многократных измерений по методу Стьюдента?
6. Что называется физической величиной?
7. Что называется измерением физической величины?
8. Какое измерение называется прямым, косвенным?
9. Что называется истинным значением физической величины?
10. Что называется действительным значением физической величины?
11. Что используется в качестве действительного значения физической величины?
12. По каким критериям классифицируют погрешности измерения физических величин?
13. Как классифицируют погрешности измерений по своим свойствам?
14. Что значит оценить погрешность измеряемой величины?
15. Дать описание систематической погрешности измерения. Как обнаруживается и учитывается при расчетах систематическая погрешность?
16. Дать описание случайной погрешности измерения. Как обнаруживается и учитывается при расчетах случайная погрешность?
17. Дать описание грубой погрешности измерения. Как обнаруживается и учитывается при расчетах грубая погрешность?
18. Дать определение погрешности измерения, абсолютной погрешности измерения, относительной погрешности измерения.
19. Как вычисляется абсолютная погрешность прибора?

20. Как записывается окончательный результат измерения если:

- 1) $\langle t \rangle = 5,0075$ мин; $\Delta t = 0,051$ мин;
- 2) $\langle \rho \rangle = 2,785$ г/м³; $\Delta \rho = 0,0074$ г/м³;
- 3) $\langle q \rangle = 0,8134$ нКл; $\Delta q = 0,0047$ нКл;
- 4) $\langle A \rangle = 0,06382$ кДж; $\Delta A = 0,00591$ кДж;
- 5) $\langle Q \rangle = 0,005864$ МДж; $\Delta Q = 0,00047$ МДж;
- 6) $\langle l \rangle = 81,345$ см; $\Delta l = 0,473$ см;
- 7) $\langle V \rangle = 28,038$ м³; $\Delta V = 0,13$ м³;
- 8) $\langle p \rangle = 234,786$ кПа; $\Delta p = 3,19$ кПа;
- 9) $\langle a \rangle = 348,51$ мм/с²; $\Delta a = 27,3$ мм/с²;
- 10) $\langle m \rangle = 9137,62$ г; $\Delta m = 86,43$ г.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Измерение высоты цилиндрического тела.

Погрешность штангенциркуля: $\lambda =$

№	1	2	3	4	5	6	7	8
h , мм								

6. Исключение грубых погрешностей:

Ранжирование:

Размах $R =$

Расчет отношений:

$$Q_1 = \frac{h_2 - h_1}{R} =$$

$$Q_2 = \frac{h_N - h_{N-1}}{R} =$$

Табличное значение ($P = 0,95$; $N =$) $Q_T =$

Сравнение отношений и вывод:

7. Обработка результатов измерений высоты по методу Стьюдента:

№	h_i , мм	$\Delta h_i = \langle h \rangle - h_i$, мм	$(\Delta h_i)^2$, мм ²
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
$\langle h \rangle =$			$\Sigma(\Delta h_i)^2 =$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S = \sqrt{\frac{\sum \Delta h_i^2}{N(N-1)}} =$

Коэффициент Стьюдента ($P = 0,95; N =$) $t_{cr} =$

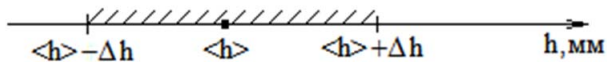
Случайная погрешность: $\alpha = t_{cr} \cdot S =$

Абсолютная погрешность: $\Delta h = \alpha + \lambda =$

Относительная погрешность: $\delta = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} \cdot 100 \% =$

Окончательный результат: $h = (\langle h \rangle \pm \Delta h) =$

8. Построение доверительного интервала:



9. Вывод.

Лабораторная работа М2 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМА ТЕЛА

Цель работы: усвоение методики обработки результатов косвенных измерений.

Приборы и материалы: микрометр, цилиндрическое тело.

Описание установки и метода измерений

Микрометр – высокоточный прибор, предназначенный для измерения линейных размеров (рис. 2.1). Микрометр состоит из скобы 1 с неподвижным упором – пяткой 2 и микрометрического винта 3. Микрометрическим называется винт с малым и точно выраженным шагом. Измеряемое тело помещается между упором 2 и микрометрическим винтом 3. Микрометры снабжены трещоткой 7, с помощью которой при измерениях поддерживается постоянная степень нажатия микрометрического винта на тело. Чтобы не сбивать совпадение нулевых отметок шкал, а также не вызывать недопустимых деформаций измеряемых тел, микрометрический винт следует вращать только за трещотку.

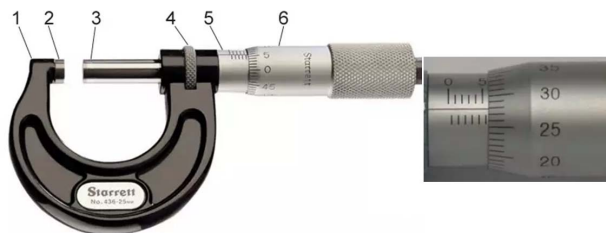


Рис. 2.1. Устройство микрометра: 1 – скоба; 2 – пятка; 3 – микрометрический винт; 4 – стопорное устройство; 5 – стембель; 6 – барабан; 7 – трещотка

Отсчет показаний микрометра производится по двум шкалам: линейной, нанесенной на стембле 5, и круговой – на барабане 6. На стембле 5 вдоль его образующей нанесена двойная шкала делений, причем отметки верхней и нижней шкал сдвинуты относительно друг друга на половину деления. На барабане 6 нанесена круговая шкала, разделенная на 50 делений. Когда микровинт и жестко

связанный с ним барабан делают один полный оборот, то барабан перемещается вдоль образующей стержня на величину шага винта $a_{\text{ш}} = 0,5$ мм. При повороте же барабана на одно деление микровинт линейно сместится на величину: $\lambda = \frac{0,5 \text{ мм}}{50} = 0,01$ мм, которая называется ценой деления круговой шкалы. За абсолютную погрешность микрометра принимается цена деления его круговой шкалы.

Искомый размер предмета можно определить по формуле

$$d = ka_{\text{ш}} + m\lambda,$$

где k — число наименьших делений двойной горизонтальной шкалы, отсчитываемых от нулевой отметки шкалы до среза барабана; $a_{\text{ш}}$ — шаг винта; m — отметка шкалы барабана, которая в момент отсчета совпадает с продольной осью двойной шкалы; λ — цена деления круговой шкалы.

При отсчете показаний полуцелые доли миллиметра отсчитываются по двойной шкале, нанесённой на стебле 5, а десятые и сотые доли миллиметра отсчитываются по шкале барабана 6.

Перед началом работы с микрометром необходимо убедиться, что прибор исправен. Для этого нужно привести в соприкосновение микрометрический винт с неподвижным упором. При этом нулевые отметки продольной и круговой шкал должны совпадать.

Программа работы

1. Прямые измерения микрометром высоты и диаметра цилиндра.
2. Косвенное измерение объема цилиндра.
3. Обработка результатов косвенного измерения объема цилиндрического тела.

Порядок работы

1. Ознакомиться с устройством микрометра. Убедиться, что прибор исправен. Определить и записать погрешность микрометра.

2. Произвести однократное измерение диаметра цилиндрического тела, для этого поместить диаметр цилиндра между упором 2 и микровинтом 3 микрометра, слегка зажать его, вращая винт за трещотку 7. Записать абсолютную погрешность однократного измерения диаметра.

3. Измерить микрометром высоту цилиндрического тела, для этого поместить его между упором 2 и микровинтом 3, слегка зажать, вращая винт за трещотку 7, и произвести 5–6 раз отсчет высоты, каждый раз меняя положение цилиндра. Оценить абсолютную погрешность прямых многократных измерений высоты по методу Стьюдента.

4. Вычислить среднее значение объема цилиндрического тела по формуле: $V = \frac{\pi d^2 h}{4}$.

5. Рассчитать абсолютную погрешность измерения объема по формуле

$$\Delta V = \langle V \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2}.$$

6. Рассчитать относительную погрешность измерения объема по формуле $\delta = \frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100\%$.

7. Записать окончательный результат $V = (\langle V \rangle \pm \Delta V) \text{ м}^3$.

8. Сделать вывод по лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Описать устройство микрометра.
2. Как производится измерение микрометром?
3. Как проверить исправность микрометра?
4. Как следует производить измерение микрометром, чтобы не вызывать недопустимых деформаций измеряемых тел и не сбивать совпадение нулевых отметок шкал?
5. Какова абсолютная погрешность микрометра?
6. Какое измерение называется косвенным?
7. Как определяется погрешность результатов косвенных измерений?
8. Как рассчитывается абсолютная погрешность сложных функций?
9. Сколько значащих цифр оставляется в окончательной записи погрешности результата измерения?
10. Чему равна погрешность измерения, если в результате наблюдений получается ряд совершенно одинаковых значений?

11. Как оценивается абсолютная погрешность в случае однократного наблюдения?
12. В каких единицах выражается погрешность аргумента тригонометрических функций?
13. Чему равна абсолютная погрешность константы π , если используется значение $\pi = 3,14$, а более точное — $3,142$?
14. Как определяется абсолютная погрешность констант, если более точное значение не известно? Показать на примере гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.
15. Как определяется абсолютная погрешность тригонометрических функций (например, $\ln x$)?
16. Как находится абсолютная погрешность величины, которая определяется по графику?
17. Каковы правила построения графиков?
18. Как определяется погрешность измерительного прибора?
19. Чему равна абсолютная погрешность дискретных величин?
20. Вывести формулу абсолютной погрешности величин, которые задаются формулами:

$$1) a = \frac{2h}{t^2};$$

$$2) \varepsilon = \frac{4 \cdot h}{t^2 \cdot d};$$

$$3) \gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2};$$

$$4) T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}};$$

$$5) a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} g;$$

$$6) J = \frac{m \cdot d^2}{8};$$

$$7) V = 2\sqrt{g \cdot l} \cdot \sin \alpha;$$

$$8) \gamma = \frac{M}{RT} \lambda^2 v^2;$$

$$9) B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

$$10) C = \frac{t}{4R \cdot \ln U}.$$

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.

5. Расчетные формулы:

объем цилиндра: $V =$

абсолютная погрешность: $\Delta V =$

6. Постоянные величины, используемые в работе:

число $\pi =$

$\Delta \pi =$

7. Измерения:

Погрешность микрометра $\lambda =$

Диаметр цилиндрического тела:

$d =$

$\Delta d =$

Высота цилиндрического тела:

№	1	2	3	4	5	6
h , мм						

8. Исключение грубых погрешностей из результатов измерений высоты:

Ранжирование:

Размах $R =$

Расчет отношений:

$Q_1 =$

$Q_2 =$

Табличное значение ($P = 0,95; N =$) $Q_T =$

Сравнение отношений и вывод:

9. Обработка результатов многократных измерений высоты по методу Стьюдента.

№	h_i , мм	$\Delta h_i = \langle h \rangle - h_i$, мм	$(\Delta h_i)^2$, мм ²
1			
2			
3			
4			
5			
6			
$\langle h \rangle =$			$\Sigma(\Delta h_i)^2 =$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента ($P = 0,95; N =$) $t_{cr} =$

Случайная погрешность: $\alpha = t_{\text{ст}} \cdot S =$

Абсолютная погрешность: $\Delta h = \alpha + \lambda$

10. Расчет объема цилиндра:

$\langle V \rangle =$

$\Delta V =$

$\delta = \frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100 \% =$

11. Окончательный результат: $V =$

12. Вывод.

Учебно-педагогические задания к лабораторным работам М1 и М2

Физика — наука экспериментальная. Именно эксперимент является либо основным критерием истины новых выдвигаемых научных гипотез, либо подтверждения или опровержения уже существующих. В этом смысле грамотное представление результатов физического эксперимента играет далеко не последнюю роль. По идее, создаваемый на лабораторном практикуме в средней школе задел знаний, позволяющий ориентироваться в методике проведения простейших физических экспериментов, должен помогать быстрее погрузиться в физический лабораторный практикум высшей школы. Однако, как показывает многолетняя практика, приступая к лабораторному практикуму, студенты часто забывают о базовых понятиях, которые играют важную роль в формировании грамотного исследовательского подхода как у инженерных специальностей, так и у педагогических. Остановимся на них подробнее.

1. Любая физическая величина — это неразделяемая совокупность ее — абсолютного значения и размерности. Указывая в результате выполнения лабораторной работы только абсолютное значение найденной физической величины, студент (или школьник) совершает грубейшую ошибку. Акцент на подобных ошибках делается еще в средней школе и это одна из первичных методических задач при погружении в курс физики. Как правило, размерность физической величины представляется как функция размерностей в системе СИ. Однако на практике часто используют внесистемные единицы. Например, скорость коррозии измеряется в мм/год, количество

электроэнергии в $\text{кВт} \cdot \text{час}$, а мощность двигателя легкового автомобиля в лошадиных силах.

Задание 1. Представьте единицу измерения физической величины в системе СИ:

- 1) скорость коррозии: $1 \text{ мм/год} =$
- 2) работа электрического тока: $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} =$
- 3) мощность двигателя 90 л. с. =
- 4) нормальное атмосферное давление: $760 \text{ мм рт. ст.} =$
- 5) приведите другие примеры известных вам внесистемных единиц измерения физических величин и переведите их в систему СИ.

2. Базовыми понятиями при представлении результатов физического эксперимента являются порядок абсолютного значения физической величины и ее стандартный вид. Несмотря на кажущуюся математическую простоту, очень часто как школьники, так и студенты младших курсов продолжают выписывать многочисленные нули в дробной части действительного числа. Важно понимать, что результат любого физического эксперимента носит приближенный характер и важна не столько точность полученного результата, сколько умение грамотно обосновать все возможные погрешности, которые формируют доверительный интервал, и затем представить результат в стандартном виде.

В 2019 году вступили в силу изменения определений основных единиц системы СИ, которые стали задаваться через фиксированные значения фундаментальных физических постоянных. При этом исчезла привязка к материальным эталонам.

В настоящее время многие физические константы имеют точные (по определению) значения. Например, скорость света в вакууме составляет $299\,792\,458 \text{ м/с}$, а одна секунда представляет собой интервал времени, равный $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями энергии основного состояния атома цезия-133.

Задание 2

1. Представьте указанные физические величины в стандартном виде, округляя множитель с точностью: до целых, десятых, сотых и тысячных:

скорость света в вакууме: $c =$

время 1 с =

2. Приведите другие примеры известных вам физических величин, которые по определению имеют точные значения, и представьте их в стандартном виде.

3. Превышение точности результатов физического эксперимента также является грубой ошибкой как у школьников, так и у студентов младших курсов. Существует притча, которая хорошо демонстрирует абсурдность превышения точности.

Диалог в музее между экскурсоводом и посетителем:

Посетитель: Какая замечательная скульптура. Сколько ей лет?

Экскурсовод: 3008 лет.

Посетитель: Откуда такая точность?

Экскурсовод: Когда я начал работать в этом музее, то мне сказали, что возраст этой скульптуры 3 тысячи лет. Я проработал 8 лет, соответственно, сейчас ее возраст 3008 лет.

Задание 3

1. Указать на ошибку экскурсовода в трактовке возраста.
2. Представить результат в стандартном виде.

Лабораторная работа МЗ

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

Цель работы: усвоить кинематические характеристики тел, совершающих поступательное движение.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, секундомер, набор перегрузов.

Описание установки и метода измерений

Машина Атвуда (рис. 3.1) состоит из вертикальной линейки 10 с сантиметровыми делениями, на верхнем конце которой находится легкий блок 7 известной массы, вращающийся с небольшим трением. Через блок перекинута легкая нить 5 с грузами 4, 9 одинаковой массы. Нить пропущена между якорем и сердечником электромагнита 6. С машиной Атвуда соединен электрический секундомер 2. Он имеет тумблер 3, который может находиться в двух положениях: «секундомер» или «магнит», и рычаг сброса показаний секундомера 1.

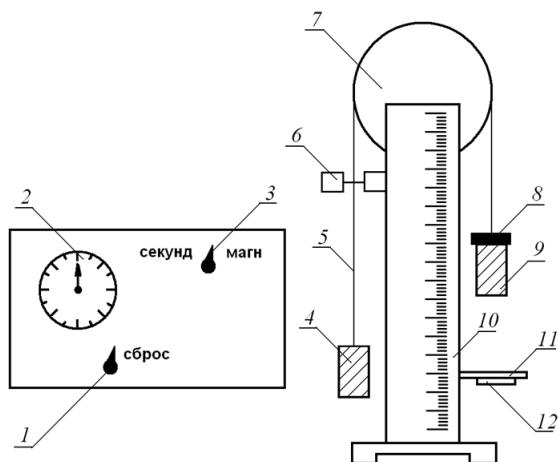


Рис. 3.1. Схема установки: 1 – рычаг сброса; 2 – секундомер; 3 – тумблер; 4 – груз; 5 – нить; 6 – электромагнит; 7 – блок; 8 – перегруз; 9 – груз; 10 – сантиметровая линейка; 11 – приемный столик; 12 – кнопка

Когда на секундомере тумблер 3 находится в положении «магнит», якорь электромагнита притягивается к сердечнику, зажимает нить, и грузы надежно фиксируются в требуемом положении.

Если на груз 9 положить перегруз 8 и перевести тумблер 3 в положение «секундомер», то система скрепленных грузов начнет двигаться равноускоренно. При касании грузом 9 приемного столика 11 с кнопкой 12 отключается электрическая система секундомера 2, и он показывает время движения груза.

Так как груз 9 движется поступательно с постоянным ускорением без начальной скорости, то его ускорение рассчитывается по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (3.1)$$

где t – время, за которое груз проходит расстояние h .

Скорость груза в конце равноускоренного движения определяется по формуле

$$V = at. \quad (3.2)$$

Программа работы

1. Прямые измерения расстояния h , проходимого грузом, и времени t его движения.
2. Определение кинематических характеристик (ускорения a , скорости V) груза, движущегося поступательно.

Порядок работы

1. Установить столик 11 на расстоянии h (60–100 см) от нулевого деления шкалы. Оценить абсолютную погрешность измерения расстояния Δh по измерительной линейке машины Атвуда.

2. Груз 9 с перегрузом 8 установить у нулевого деления шкалы и зафиксировать это положение путем переключения тумблера 3 в положение «магнит».

3. Посредством рычага 1 установить стрелку секундомера на нулевое деление его шкалы.

4. Измерить время падения груза. Для этого переключить тумблер 3 в положение «секундомер» и нажать кнопку 12. При достиже-

нии грузом 9 столика 11 секундомер отключится. Записать его показание. Опыт повторить 6 раз. Оценить погрешность секундомера λ .

5. Определить абсолютную погрешность измерения времени Δt по методу Стьюдента.

6. Определить среднее значение модуля ускорения опускающегося груза по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta a = \langle a \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%.$$

Записать окончательный результат: $a = \langle a \rangle \pm \Delta a$ м/с².

7. Определить среднее значение модуля скорости груза в конце движения по формуле: $V = a \cdot t$.

Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta V = \langle V \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta V}{\langle V \rangle} 100\%.$$

Записать окончательный результат: $V = \langle V \rangle \pm \Delta V$ м/с.

8. Сделать вывод по лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений?
4. Описать устройство машины Атвуда.

5. Какое движение совершает груз? Какие характеристики этого движения определяются в работе?
6. Дать определение поступательного движения.
7. Дать определение средней скорости тела.
8. Дать определение мгновенной скорости тела.
9. Дать определение среднего ускорения тела.
10. Дать определение мгновенного ускорения тела.
11. Каков физический смысл касательного ускорения тела \vec{a}_t ?
12. Каков физический смысл нормального ускорения тела \vec{a}_n ?
13. Записать формулу полного ускорения тела и его модуль.
14. Изобразить на рисунке векторы скорости, касательного, нормального и полного ускорений.
15. Вывод расчетных формул: a , V .

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
 - а) модуль ускорения опускающегося груза, абсолютная погрешность:

$$a = \qquad \qquad \qquad \Delta a =$$
 - б) модуль скорости груза в конце движения, абсолютная погрешность:

$$V = \qquad \qquad \qquad \Delta V =$$
6. Измерения:

пройденное грузом расстояние: $h = \qquad \qquad \qquad \Delta h =$

время опускания груза:

№	1	2	3	4	5	6
t, c						

Погрешность секундомера: $\lambda =$

7. Обработка результатов измерений времени по методу Стьюдента.

Исключение грубых погрешностей из результатов при измерении времени

Ранжирование:

Размах: $R =$

Расчет отношений: $Q_1 =$ $Q_2 =$ $Q_{\text{таб}}(N = 6) =$

Сравнение отношений и вывод:

№	$t_i, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	Δt_i^2
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t \rangle =$$

$$\Sigma \Delta t_i^2 =$$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{\text{кр}}(P = 0,95; N = \quad) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

Абсолютная погрешность: $\Delta t =$

8. Расчеты:

$$\langle a \rangle =$$

$$\Delta a =$$

$$\delta = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $a =$

$$\langle V \rangle =$$

$$\Delta V =$$

$$\delta = \frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $V =$

9. Вывод:

Лабораторная работа М4 ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

Цель работы: усвоить кинематические характеристики тела, совершающего вращательное движение.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, набор грузов.

Описание установки и метода измерений

Маятник Обербека (рис. 4.1) представляет собой маховик с крестообразными стержнями 2, по которым могут перемещаться и закрепляться в нужном положении цилиндрические грузы 1 одинаковой массы. На оси маховика находятся два шкива 3, 4 различного радиуса. На один из шкивов наматывается нить 5. Нить перекинута через неподвижный блок 6. К концу нити прикреплена площадка 8. При помощи грузов 7 различной массы, помещаемых на площадку, маятник приводится во вращательное движение.

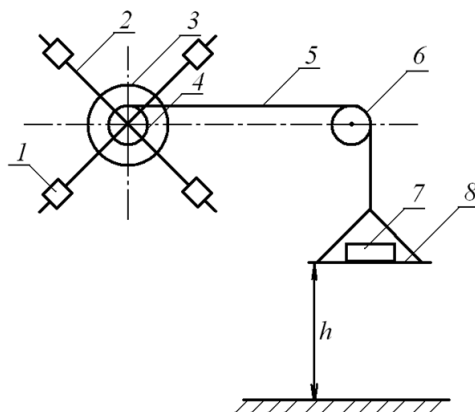


Рис. 4.1. Схема установки: 1 – цилиндрический груз; 2 – стержень; 3 – большой шкив; 4 – малый шкив; 5 – нить; 6 – блок; 7 – груз; 8 – площадка

Поместим груз 7 определенной массы на площадку 8. Установим площадку с грузом на некоторой высоте h от пола.

Если груз 7, удерживаемый на высоте h , отпустить, то он будет двигаться поступательно вниз с некоторым ускорением a .

Воспользуемся формулой пути при равноускоренном прямолинейном движении: $h = V_0 t + \frac{at^2}{2}$. Отсюда, с учетом нулевой начальной скорости $V_0 = 0$, получим формулу для расчета ускорения груза:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (4.1)$$

где t — время, за которое груз пройдет расстояние h .

Скорость в конце движения груза с учетом нулевой начальной скорости $V_0 = 0$ определяется по формуле

$$V = a \cdot t. \quad (4.2)$$

При падении груза маятник Обербека будет вращаться с некоторым угловым ускорением ε .

Если нить, на которой подвешен груз массой m , нерастяжима и сматывается со шкива маятника Обербека без проскальзывания, то касательное ускорение точек, лежащих на поверхности шкива, будет равно ускорению опускающегося груза: $a_\tau = a$.

Зная связь между касательным ускорением точек вращающегося шкива и его угловым ускорением $a_\tau = \varepsilon \cdot R$, можно определить угловое ускорение маятника Обербека:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{R} = \frac{a}{R} = \frac{2a}{d} = \frac{4h}{d \cdot t^2}, \quad (4.3)$$

где d — диаметр шкива маятника.

Используя формулу связи между угловой скоростью тела и линейной скоростью точек тела $V = \omega \cdot R$, рассчитаем угловую скорость маятника Обербека:

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{2V}{d} = \frac{4h}{d \cdot t}. \quad (4.4)$$

Программа работы

1. Прямые измерения диаметра d шкива, расстояния h , проходимо-го грузом и времени t его движения.
2. Определение кинематических характеристик (углового ускорения ε , угловой скорости ω) вращательного движения.

Порядок работы

1. Расположить цилиндрические грузы l на концах стержней 2 маятника Обербека симметрично относительно оси вращения.

2. Измерить штангенциркулем диаметр d того шкива (большого или малого), на который будет наматываться нить. Оценить абсолютную погрешность измерения диаметра по прибору.

3. Положить на площадку груз массой m (выбрать значение из диапазона 50–100 г).

4. Намотать на шкив нить так, чтобы площадка с грузом оказалась на высоте h (80–100 см) над уровнем пола. Измерить высоту масштабной линейкой. Оценить абсолютную погрешность измерения высоты Δh по прибору.

5. Измерить время падения груза секундомером. Опыт повторить 5–6 раз. Оценить погрешность секундомера λ .

6. Определить абсолютную погрешность многократных измерений времени Δt по методу Стьюдента.

7. Вычислить среднее значение модуля углового ускорения шкива по формуле:

$$\varepsilon = \frac{4h}{d \cdot t^2}.$$

Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta\varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle} \cdot 100 \%$$

Записать окончательный результат: $\varepsilon = (\langle \varepsilon \rangle \pm \Delta\varepsilon)$ рад/с².

8. Вычислить среднее значение модуля угловой скорости шкива по формуле:

$$\omega = \frac{4h}{d \cdot t}.$$

Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta\omega = \langle \omega \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\langle\omega\rangle} \cdot 100\%.$$

Записать окончательный результат: $\omega = (\langle\omega\rangle \pm \Delta\omega)$ рад/с.

9. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство маятника Обербека.
5. Какое движение совершает маятник Обербека? Какие характеристики этого движения определяются в работе?
6. Почему касательное ускорение точек, лежащих на поверхности шкива, равно ускорению опускающегося груза?
7. Дать определение вращательного движения.
8. Дать определение средней угловой скорости тела.
9. Дать определение мгновенной угловой скорости тела.
10. Дать определение среднего углового ускорения.
11. Дать определение мгновенного углового ускорения.
12. Какова связь между угловой скоростью тела и скоростями точек этого тела?
13. Какова связь между угловым ускорением тела и касательными ускорениями точек этого тела?
14. Изобразить на рисунке векторы угловой скорости и углового ускорения для ускоренного и замедленного движений.
15. Вывод расчетных формул: ε , ω .

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
 - а) модуль углового ускорения и абсолютная погрешность:

$$\varepsilon = \qquad \qquad \qquad \Delta\varepsilon =$$

- б) модуль угловой скорости и абсолютная погрешность:

$$\omega = \qquad \qquad \qquad \Delta\omega =$$

6. Измерения:

пройденное грузом расстояние: $h = \qquad \qquad \qquad \Delta h =$

диаметр шкива: $d = \qquad \qquad \qquad \Delta d =$

время опускания груза:

№	1	2	3	4	5	6
t, c						

Погрешность секундомера: $\lambda =$

7. Обработка результатов измерения времени:

Исключение грубых погрешностей:

Ранжирование:

Размах: $R =$

Расчет отношений: $Q_1 = \qquad \qquad \qquad Q_2 = \qquad \qquad \qquad Q_{таб}(N = 6) =$

Сравнение отношений и вывод:

№	t_j, c	$\Delta t_j, c$	$\Delta t_j^2, c^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t \rangle = \qquad \qquad \qquad \Sigma \Delta t_j^2 =$$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{cr}(P = 0,95; N = \quad) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

Абсолютная погрешность: $\Delta t =$

8. Расчеты:

$\langle \varepsilon \rangle =$

$\Delta \varepsilon =$

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $\varepsilon =$

$\langle \omega \rangle =$

$\Delta \omega =$

$$\delta = \frac{\Delta \omega}{\langle \omega \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $\omega =$

9. Вывод:

Учебно-педагогические задания с элементами исследования к лабораторным работам М3 и М4

Кинематика – раздел механики, изучающий движение тел без исследования причин, вызывающих это движение. Фактически кинематика – это смесь геометрии и хронометрии, и одной из основных задач кинематики является правильное описание траектории движущихся тел с использованием аналитических средств математики. При этом очень важно не забывать про начальные условия (где находилось тело в начальный момент отсчета времени). В качестве упражнения предлагается решить несколько заданий.

Задание 4. Тело начинает движение на координатной плоскости из точки с координатами $(x_0; y_0)$ с постоянной скоростью \vec{v} , направленной под углом α к оси ОУ. Напишите уравнения движения тела по осям $x(t)$, $y(t)$ и получите уравнение траектории $y(x)$.

Как изменится вид уравнений движения и уравнение траектории, если скорость перестанет быть постоянной?

Возможно ли получить явное аналитическое решение в качестве ответа на поставленные вопросы?

Задание 5. Тело начинает движение на координатной плоскости из точки с координатами $(x_0; y_0)$ с постоянной скоростью \vec{v} , направленной под углом α к оси ОУ. Модуль скорости зависит от времени по закону $|\vec{v}| = \beta x$, где β — некоторая константа. Напишите уравнения движения тела по осям $x(t)$, $y(t)$ и получите уравнение траектории $y(x)$.

Задание 6. Тело начинает движение на координатной плоскости из точки с координатами $(x_0; y_0)$ с постоянной скоростью \vec{v} , направленной под углом α к оси ОУ. Модуль скорости зависит от координаты по закону $|\vec{v}| = \lambda x$, где λ — некоторая константа. Напишите уравнения движения тела по осям $x(t)$, $y(t)$ и получите уравнение траектории $y(x)$.

Задание 7. Предполагая, что положение тела на плоскости характеризуется радиус-вектором с модулем $|\vec{r}(t)| = \sqrt{[x(t)]^2 + [y(t)]^2}$, найдите зависимость $|\vec{r}(t)|$ для заданий 4–6.

Задание 8. Получите аналитические зависимости модуля скорости от модуля радиус-вектора. Представьте эти зависимости графически, выбирая значение модуля радиус-вектора в качестве оси абсцисс и значение модуля скорости в качестве оси ординат.

Задания 7, 8 демонстрируют постепенный переход от простой задачи к исследовательской с усложнением проводимых аналитических вычислений. В этом смысле кинематика, являясь первым разделом в механике, не только создает задел для адекватного восприятия динамики, но и приучает к внимательности при проведении правильных математических выкладок как у школьников, так и у студентов младших курсов.

Лабораторная работа М5 ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА ИНЕРЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: усвоить законы движения материальной точки и механической системы; определить силу реакции оси блока машины Атвуда.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, секундомер, перегрузы различной массы.

Описание установки и метода измерений

Машина Атвуда (рис. 5.1, 5.2) состоит из вертикальной линейки 10 с сантиметровыми делениями, на верхнем конце которой находится легкий блок 7 известной массы, вращающийся с небольшим трением. Через блок перекинута легкая нить 5 с грузами 4, 9 одинаковой массы. Нить пропущена между якорем и сердечником электромагнита 6. С машиной Атвуда соединен электрический секундомер 2. Он имеет тумблер 3, который может находиться в двух положениях: «секундомер» или «магнит», и рычаг сброса показаний секундомера 1.

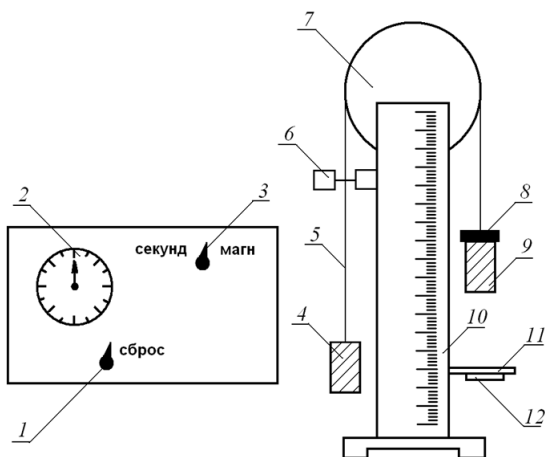


Рис. 5.1. Схема установки: 1 – рычаг сброса; 2 – секундомер; 3 – тумблер; 4 – груз; 5 – нить; 6 – электромагнит; 7 – блок; 8 – перегруз; 9 – груз; 10 – сантиметровая линейка; 11 – приемный столик; 12 – кнопка

Когда на секундомере тумблер 3 находится в положении «магнит», якорь электромагнита притягивается к сердечнику, зажимает нить и грузы надежно фиксируются в требуемом положении.

Если на груз 9 положить перегруз δ и перевести тумблер 3 в положение «секундомер», то система скрепленных грузов начнет двигаться равноускоренно. При касании грузом 9 приемного столика 11 с кнопкой 12 отключается электрическая система секундомера 2 и он показывает время движения груза.

В данной лабораторной работе механическая система состоит из блока 7 массой m_1 , грузов 4, 9 массой m_2 и перегруза δ массой m_3 .

Для вывода расчетной формулы (рис. 5.3) запишем закон движения центра инерции для данной механической системы:

$$(m_1 + 2m_2 + m_3)\vec{a}_c = m_1\vec{g} + 2m_2\vec{g} + m_3\vec{g} + \vec{N}, \quad (5.1)$$

где \vec{a}_c – ускорение центра масс механической системы; $m_1\vec{g}$ – сила тяжести, действующая на блок; $m_2\vec{g}$ – сила тяжести, действующая на груз; $m_3\vec{g}$ – сила тяжести, действующая на перегруз; \vec{N} – сила реакции оси блока.

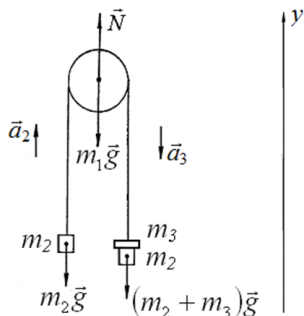


Рис. 5.3. Изображение сил, действующих на тела механической системы



Рис. 5.2. Изображение установки

Из уравнения (5.1) выразим силу реакции:

$$\vec{N} = (m_1 + 2m_2 + m_3)\vec{a}_c - (m_1 + 2m_2 + m_3)\vec{g}. \quad (5.2)$$

Радиус-вектор центра масс механической системы определяется по формуле

$$\vec{r}_c = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + m_2\vec{r}_3 + m_3\vec{r}_3}{m_1 + 2m_2 + m_3}. \quad (5.3)$$

Продифференцировав это выражение дважды по времени, получим ускорение центра масс механической системы:

$$\vec{a}_c = \frac{m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 + m_2\vec{a}_3 + m_3\vec{a}_3}{m_1 + 2m_2 + m_3}. \quad (5.4)$$

Так как блок поступательно не перемещается, то его ускорение равно нулю: $\vec{a}_1 = 0$. Из условия, что нить нерастяжима, следует: $\vec{a}_3 = -\vec{a}_2$. Поэтому уравнение (5.4) примет вид:

$$\vec{a}_c = \frac{m_3\vec{a}_3}{m_1 + 2m_2 + m_3}. \quad (5.5)$$

Объединяя уравнения (5.2) и (5.5), получим:

$$\vec{N} = m_3\vec{a}_3 - (m_1 + 2m_2 + m_3)\vec{g}. \quad (5.6)$$

Запишем уравнение (5.6) в проекциях на ось Y :

$$N = (m_1 + 2m_2 + m_3)g - m_3a_3. \quad (5.7)$$

Модуль ускорения перегруза массой m_3 , движущегося равноускоренно без начальной скорости, определяется по формуле

$$a_3 = \frac{2h}{t^2}, \quad (5.8)$$

где h – расстояние, проходимое перегрузом за время t .

Из выражений (5.7) и (5.8) получим формулу для расчета силы реакции оси блока машины Атвуда:

$$N = (m_1 + 2m_2 + m_3)g - \frac{2m_3h}{t^2}. \quad (5.9)$$

Программа работы

1. Измерение времени опускания груза. Обработка результатов измерений по методу Стьюдента.
2. Определение силы реакции оси блока машины Атвуда.

Порядок работы

1. Записать исходные данные по лабораторной работе: массы блока m_1 , грузов m_2 и перегруза m_3 . Они приведены на установке. Записать их абсолютные погрешности.

2. Установить столик II на расстоянии h (60–100 см) от нулевого деления шкалы. Оценить абсолютную погрешность измерения высоты Δh по прибору.

3. Поместить перегруз 8 на груз 9 и установить их у нулевого деления шкалы, зафиксировав это положение путем переключения тумблера 3 в положение «магнит». Посредством рычага I установить стрелку секундомера на нулевое деление.

4. Измерить время падения груза. Для этого нажать кнопку 12 и перевести тумблер I в положение «секундомер». При достижении грузом 9 столика II секундомер отключится. Записать его показание. Опыт повторить 6 раз. Рассчитать абсолютную погрешность измерений времени Δt по методу Стьюдента.

5. Вычислить общую массу грузов и перегруза:

$$m_0 = m_1 + 2m_2 + m_3.$$

6. Рассчитать абсолютную погрешность общей массы:

$$\Delta m_0 = \sqrt{(\Delta m_1)^2 + (\Delta m_2)^2 + (\Delta m_3)^2}.$$

7. Вычислить силу реакции оси по формуле

$$N = m_0 g - \frac{2m_3 h}{t^2}.$$

8. Рассчитать абсолютную погрешность силы реакции по формуле

$$\Delta N = \sqrt{(g \cdot \Delta m_0)^2 + (m_0 \cdot \Delta g)^2 + \left(\frac{2m_3}{t^2} \Delta h\right)^2 + \left(\frac{2h}{t^2} \Delta m_3\right)^2 + \left(\frac{4m_3 h}{t^3} \Delta t\right)^2}.$$

9. Рассчитать относительную погрешность силы реакции

$$\delta = \frac{\Delta N}{\langle N \rangle} \cdot 100\%.$$

10. Записать окончательный результат $N = (\langle N \rangle \pm \Delta N)$ Н.

11. Сделать вывод по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство машины Атвуда.
5. Из каких тел состоит механическая система, изучаемая в данной работе?
6. Перечислить силы, действующие на тела механической системы в работе.
7. Что называется механической системой?
8. Какая механическая система называется замкнутой?
9. Что называется импульсом: а) тела; б) механической системы?
10. Что называется центром инерции механической системы?
11. Записать формулу радиус-вектора центра масс механической системы.
12. Записать формулу скорости центра масс механической системы.
13. Записать формулу ускорения центра масс механической системы.
14. Какова связь импульса механической системы и скорости движения ее центра инерции?
15. Сформулировать и записать закон движения центра масс механической системы.
16. Дать определение силы реакции опоры или подвеса.
17. Записать и сформулировать второй закон Ньютона.
18. Дать определение внутренних сил для механической системы.
19. Дать определение внешних сил для механической системы.
20. Вывести расчетную формулу силы реакции оси блока N .

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.

4. Схема установки.

5. Расчетные формулы:

общая масса и ее абсолютная погрешность:

$$m_0 = \quad \Delta m_0 =$$

сила реакции оси блока и ее абсолютная погрешность:

$$N = \quad \Delta N =$$

6. Исходные данные:

$$\text{масса блока:} \quad m_1 = \quad \Delta m_1 =$$

$$\text{масса груза:} \quad m_2 = \quad \Delta m_2 =$$

$$\text{масса перегруза:} \quad m_3 = \quad \Delta m_3 =$$

$$\text{ускорение свободного падения: } g = \quad \Delta g =$$

7. Измерения:

$$\text{пройденное расстояние: } h = \quad \Delta h =$$

время опускания груза:

№	1	2	3	4	5	6
$t, \text{ c}$						

Погрешность секундомера: $\lambda =$

8. Обработка результатов измерений времени по методу Стьюдента.

Исключение грубых погрешностей из результатов при измерении времени

Ранжирование:

Размах: $R =$

Расчет отношений: $Q_1 = \quad Q_2 = \quad Q_{\text{таб}}(N=6) =$

Сравнение отношений и вывод:

№	$t_i, \text{ c}$	$\Delta t_i, \text{ c}$	Δt_i^2
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t \rangle =$$

$$\Sigma \Delta t_i^2 =$$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{cr}(N = \quad) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

Абсолютная погрешность: $\Delta t =$

9. Расчеты:

$m_0 =$

$\Delta m_0 =$

$\langle N \rangle =$

$\Delta N =$

$\delta = \frac{\Delta N}{\langle N \rangle} \cdot 100 \% =$

Окончательный результат: $N =$

10. Вывод.

Учебно-педагогические задания с элементами исследования к лабораторной работе М5

Центр инерции (центр масс) является одним из фундаментальных понятий физики. Движение любой распределенной в пространстве системы масс можно всегда представить в виде суперпозиции двух движений: движения центра масс и движения относительно центра масс. Поэтому определение положения центра масс является одной из основных задач механики. И если в случае распределенной системы масс материальных точек положение центра масс считается тривиально (формула (5.4) лабораторной работы 5), то в случае физического тела конечной формы необходимо прибегать к математическим методам интегрального исчисления. Если тело имеет плоскую форму с однородной плотностью (например, полукруг, вырезанный из картона), то нахождение положения центра масс сводится к интегрированию, однако определить положение центра масс можно и экспериментально.

Задание 9. Предлагается экспериментально определить центр масс полукруга, вырезанного из картона. Для этого тело подвешивается на нитку с зацеплением вблизи полуокружности. После установления равновесия вертикаль, проведенная через точку подвеса, обязательно будет проходить через центр масс (объясните почему).

Необходимо зафиксировать эту вертикаль карандашом. Выбирая другую точку подвеса, мы также получим вертикаль, проходящую через центр масс. Пересечение этих двух вертикалей и даст положение центра масс.

Задание 10. Подсчитать аналитически положение центра масс методами интегрального исчисления. Сравнить полученные результаты, подсчитать относительную погрешность отклонения положения центра масс, найденного экспериментально, от найденного аналитического и пояснить причины появления данной погрешности.

Демонстрация эксперимента по нахождению центра масс тел плоской формы (даже с весьма сложной границей) доступна как для учеников средней школы, так и для студентов младших курсов. Данный эксперимент методически прост, однако он позволяет закрепить базовые знания о положении центра масс и умении сопоставлять результаты эксперимента с расчетными данными. Именно на этом этапе вводится понятие верификации результатов эксперимента аналитическими данными, которое является одним из основных критериев удачного эксперимента в любой исследовательской практике.

Лабораторная работа М6 ПРОВЕРКА ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

Цель работы: изучение поступательного движения и проверка второго закона Ньютона.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, секундомер, перегрузы различной массы.

Описание установки и метода измерений

Изучение законов динамики поступательного движения производится на машине Атвуда (рис. 6.1, 6.2).

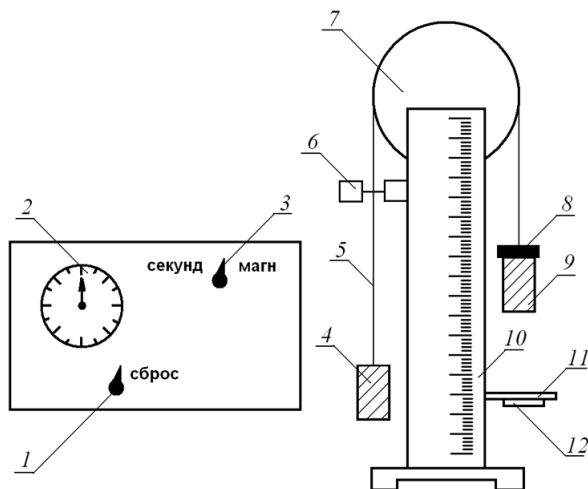


Рис. 6.1. Схема установки: 1 – рычаг сброса; 2 – секундомер; 3 – тумблер; 4 – груз; 5 – нить; 6 – электромагнит; 7 – блок; 8 – перегруз; 9 – груз; 10 – сантиметровая линейка; 11 – приемный столик; 12 – кнопка

Машина Атвуда состоит из вертикальной штанги 10 со шкалой, сверху которой установлен легкий блок 7, укрепленный на корундовых подшипниках, способный вращаться с незначительным трением. Через блок перекинута тонкая капроновая нить с подвешенными грузами 4, 9 одинаковой массы m . Положение грузов фиксируется при выключенном секундомере электромагнитной защелкой 6: включение секундомера одновременно вы-

ключает электромагнит и нить с грузами освобождается. На штанге крепится приемный столик II , ограничивающий падение грузов и размыкающий электрическую цепь секундомера. Для приведения столика в рабочее состояние подтолкните снизу сердечник столика. Перегруз δ , под действием которого грузы приходят в движение, кладется на тот груз, на стороне которого находится приемный столик.

Рассмотрим движение системы, состоящей из двух грузов массой m и $(m + m_1)$ и блока радиусом r с моментом инерции J .

Если грузы одинаковы, то потенциальная энергия системы не зависит от их высоты, так как убыль потенциальной энергии одного груза приводит к эквивалентному возрастанию потенциальной энергии другого. Следовательно, когда грузы различны, изменение потенциальной энергии системы определяется положением перегруза массой m_1 .

Пусть правый груз с перегрузом m_1 опустился на расстояние h . Тогда изменение потенциальной энергии системы равно:

$$\Delta E_{\text{п}} = m_1 g h, \quad (6.1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения (работой по преодолению сил трения пренебрегаем). Приобретенная кинетическая энергия равна изменению потенциальной энергии:

$$m_1 g h = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{(m + m_1)V^2}{2} + \frac{mV^2}{2}. \quad (6.2)$$

В этой формуле первое слагаемое в правой части равенства представляет собой кинетическую энергию вращения блока, второе – кинетическую энергию поступательного движения правого груза с перегрузом и третье слагаемое – кинетическую энергию поступательного движения левого груза.



Рис. 5.2. Изображение установки

Так как движение грузов происходит под действием постоянной силы, то оно является равноускоренным $\vec{a} = \text{const}$ и для него выполняются соотношения $V = a \cdot t$, $h = \frac{at^2}{2}$. Угловую скорость вращения блока выразим через линейную скорость $\omega = \frac{V}{r}$.

Подставляя значения h , ω , V в выражение (6.2), получим:

$$a = \frac{m_1 g}{2m + m_1 + \frac{J}{r^2}}. \quad (6.3)$$

Если пренебречь моментом инерции блока (в данной работе эта величина мала), то формула ускорения, с которым движется система скрепленных тел (6.3), примет вид:

$$a = \frac{m_1 g}{2m + m_1}. \quad (6.4)$$

При проверке второго закона Ньютона необходимо, чтобы движущаяся масса оставалась постоянной, а величина действующей силы изменялась. Это можно осуществить, перекладывая перегрузы m_1 и m_2 с одного груза на другой.

Сила, приводящая систему в движение, равна разности сил тяжести правого и левого тел.

Если оба перегруза находятся на правом теле, то

$$F_1 = (m_1 + m_2)g. \quad (6.5)$$

Если меньший перегруз (m_2) переложить на левое тело, то

$$F_2 = (m_1 - m_2)g. \quad (6.6)$$

Для двух различных случаев на основании второго закона Ньютона получим:

$$F_1 = (2m + m_1 + m_2)a_1, \quad (6.7)$$

$$F_2 = (2m + m_1 + m_2)a_2. \quad (6.8)$$

Выразим пройденный путь через ускорение и время движения

$$h_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}, \quad (6.9)$$

$$h_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2}. \quad (6.10)$$

Если в первом и втором случае пройденный путь одинаков $h_1 = h_2$, то

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (6.11)$$

Таким образом, проверка второго закона Ньютона сводится к проверке справедливости соотношения

$$\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (6.12)$$

Программа работы

1. Измерение времени движения системы, когда на правом грузе расположены два перегруза.
2. Измерение времени движения системы, когда на правом грузе расположен больший перегруз, а на левом грузе — меньший перегруз.
3. Рассчитать величины, стоящие в правой и левой части соотношения (6.12) и проверить его справедливость.

Порядок работы

1. Выбрать два перегруза разной массы. Записать массу большего перегруза m_1 и меньшего m_2 . Записать их абсолютные погрешности.
2. Установить столик II на расстоянии h (80–100 см) от нулевого деления шкалы.
3. Поместить перегрузы массами m_1 и m_2 на правый груз 9 .
4. Установить правый груз 9 у нулевого деления шкалы, зафиксировав это положение путем переключения тумблера 3 в положение «магнит». Посредством рычага I установить стрелку секундомера на нулевое деление.
5. Измерить время движения грузов. Для этого нажать кнопку 12 и перевести тумблер I в положение «секундомер». При достижении грузом 9 столика II секундомер отключится. Записать его показание. Опыт повторить 6 раз. Рассчитать абсолютную погрешность измерений времени Δt по методу Стьюдента.
6. Переложить меньший перегруз m_2 на левый груз и повторить пп. 4, 5.

7. Рассчитать левую часть соотношения (6.12) $A = \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2}$ и ее абсолютную погрешность

$$\Delta A = \frac{2}{(m_1 - m_2)^2} \sqrt{(m_2(m_1 - 1)\Delta m_1)^2 + (m_1(1 - m_2)\Delta m_2)^2}.$$

Записать окончательный результат: $A = \langle A \rangle \pm \Delta A$.

8. Рассчитать правую часть соотношения (6.12) $B = \frac{t_2^2}{t_1^2}$ и ее абсолютную погрешность

$$\Delta B = \langle B \rangle \sqrt{\left(\frac{2\Delta t_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{t_2}\right)^2}.$$

Записать окончательный результат: $B = \langle B \rangle \pm \Delta B$.

9. Сравнить величины, стоящие в правой и левой части соотношения (6.12) и сделать вывод о выполнении второго закона Ньютона.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство машины Атвуда.
5. Из каких тел состоит механическая система, изучаемая в данной работе?
6. Какое движение называется поступательным?
7. Какое движение называется вращательным?
8. Какое движение называется равноускоренным?
9. Записать кинематические уравнения пути и скорости для равноускоренного движения.
10. Записать формулу связи линейной и угловой скорости.
11. Что изучает динамика?
12. Сформулировать и записать первый закон Ньютона.
13. Сформулировать и записать второй закон Ньютона.
14. Сформулировать и записать третий закон Ньютона.

15. Какая система отсчета называется инерциальной? Является ли система отсчета, связанная с Землей, инерциальной?
16. Дать определение кинетической энергии поступательного движения и записать формулу.
17. Дать определение кинетической энергии вращательного движения и записать формулу.
18. Дать определение потенциальной энергии тела и записать формулу.
19. Записать и сформулировать закон сохранения полной механической энергии.
20. Вывести рабочее соотношение (6.12).

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.

5. Расчетное соотношение: $\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}$.

$A =$ $\Delta A =$

$B =$ $\Delta B =$

6. Исходные данные:

масса большего перегруза: $m_1 =$ $\Delta m_1 =$

масса меньшего перегруза: $m_2 =$ $\Delta m_2 =$

7. Измерения:

пройденное расстояние: $h =$ $\Delta h =$

время движения системы, когда на правом грузе расположены два перегруза:

№	1	2	3	4	5	6
t_1, c						

время движения системы, когда на правом грузе расположен больший перегруз m_1 , а на левом – меньший m_2 :

№	1	2	3	4	5	6
t_2, c						

Погрешность секундомера: $\lambda =$

8. Обработка результатов измерений времени t_1 по методу Стьюдента.

№	$t_i, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	$\Delta t_i^2 =$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t_1 \rangle =$$

$$\Sigma \Delta t_i^2 =$$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{\text{cr}}(N =) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

Абсолютная погрешность: $\Delta t_1 =$

9. Обработка результатов измерений времени t_2 по методу Стьюдента.

№	$t_i, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	$\Delta t_i^2 =$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t_2 \rangle =$$

$$\Sigma \Delta t_i^2 =$$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{\text{cr}}(N =) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

13. Абсолютная погрешность: $\Delta t_2 =$

10. Расчеты:

$$\langle A \rangle =$$

$$\Delta A =$$

Окончательный результат: $A =$

$$\langle B \rangle =$$

$$\Delta B =$$

Окончательный результат: $B =$

11. Сравнение результатов.

12. Вывод.

Учебно-педагогические задания к лабораторной работе М6

Динамика изучает причины различных изменений механического движения. Базисом динамического подхода являются законы Ньютона и будущему педагогу очень важно понимать значение каждого из законов в решении задач механики. Обычно как школьники, так и студенты младших курсов с удовольствием «эксплуатируют» второй закон Ньютона при решении задач, не придавая значение первому и третьему законам Ньютона, считая их очевидными и не требующими обсуждения. Однако правильный выбор инерциальной системы отсчета по первому закону Ньютона, относительно которой будет решаться конкретная задача механики, а также учет взаимодействия тел по третьему закону Ньютона играют далеко не последнюю роль в получении правильного ответа.

Очень часто как школьники, так и студенты младших курсов путают понятия «сила тяжести» и «вес тела». В этом смысле в качестве упражнения предлагаются следующие задания.

Задание 11. На поверхности столика в гравитационном поле Земли стоит кубик массы m . Необходимо сделать рисунок, обозначить все действующие на кубик и столик силы и, применяя все три (!) закона Ньютона, найти, чему равна сила тяжести, действующая на кубик, и вес кубика.

Задание 12. Решить задание 11 в случае, если столик движется вверх с ускорением \vec{a} .

Задание 13. Решить задание 11 в случае, если столик движется вниз с ускорением \vec{a} .

Задание 14. Решить задание 11 в случае, если столик свободно падает.

На первый взгляд — очень простая задача, однако указать, на каком этапе решения какой из законов Ньютона применяется, оказывается не так просто. А именно это и определяет правильность подхода, который состоит не только в бездумном выписывании формул, но и в аргументации причин, по которым мы имеем право писать эти формулы.

В качестве дополнительного упражнения на понимание первого и третьего законов Ньютона предлагается выполнить следующие задания.

Задание 15. Человек поднимается с постоянной скоростью по наклонной плоскости с конечным коэффициентом трения между ботинками и наклонной плоскостью. Сделайте рисунок и обозначьте все силы, действующие на человека.

Задание 16. Человек спускается с постоянной скоростью по наклонной плоскости с конечным коэффициентом трения между ботинками и наклонной плоскостью. Сделайте рисунок и обозначьте все силы, действующие на человека.

Задание 17. Тело 1 действует на тело 2 с силой \vec{F}_{12} , тело 2 действует на тело 1 с силой \vec{F}_{21} . По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$. Чему равна равнодействующая этих сил?

Понимание и правильная трактовка наиболее простых вопросов и задач является базисом для успешного применения механики Ньютона в более сложных исследовательских задачах.

Лабораторная работа М7 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ПОЛНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: экспериментальная проверка справедливости закона сохранения полной механической энергии.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, секундомер, набор перегрузов различной массы.

Описание установки и метода измерений

Машина Атвуда (рис. 7.1, 7.2) состоит из вертикальной линейки 10 с сантиметровыми делениями, на верхнем конце которой находится легкий блок 7 известной массы, вращающийся с небольшим трением. Через блок перекинута легкая нить 5 с грузами 4, 9 одинаковой массы. Нить пропущена между якорем и сердечником электромагнита 6. С машиной Атвуда соединен электрический секундомер 2. Он имеет тумблер 3, который может находиться в двух положениях: «секундомер» или «магнит», и рычаг сброса показаний секундомера 1.

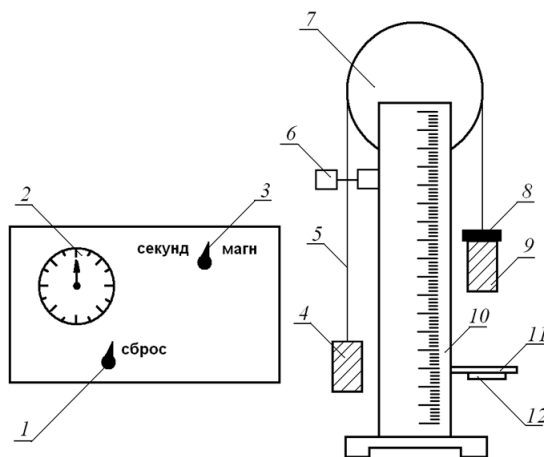


Рис. 7.1. Схема установки: 1 – рычаг сброса; 2 – секундомер; 3 – тумблер; 4 – груз; 5 – нить; 6 – электромагнит; 7 – блок; 8 – перегруз; 9 – груз; 10 – сантиметровая линейка; 11 – приемный столик; 12 – кнопка

Когда на секундомере тумблер 3 находится в положении «магнит», якорь электромагнита притягивается к сердечнику, зажимает нить, и грузы надежно фиксируются в требуемом положении.

Если на груз 9 положить перегруз 8 и перевести тумблер 3 в положение «секундомер», то система скрепленных грузов начнет двигаться равноускоренно. При касании грузом 9 приемного столика 11 с кнопкой 12 отключается электрическая система секундомера 2, и он показывает время движения груза.

С помощью данной установки убедимся в справедливости общефизического закона сохранения энергии.

Закон сохранения полной механической энергии гласит, что изменение полной механической энергии системы при ее переходе из одного состояния в другое равно совершенной при этом работе неконсервативных сил:

$$E_2 - E_1 = A^{\text{неконс}}. \quad (7.1)$$

Полная механическая энергия системы равна сумме кинетической и потенциальной энергий всех тел системы: $E = E_k + E_n$.

Механическая система взаимодействующих тел состоит из двух грузов 4, 9 одинаковой массы m , перегруза 8 массы m_1 и блока 7 массы $m_{\text{бл}}$.

Рассчитаем полную энергию системы E_1 в начальный момент времени. Так как в начальный момент все тела системы покоятся, то кинетическая энергия системы равна нулю: $E_{k1} = 0$. Груз 4 в начальный момент находится на нулевой высоте от уровня столика, а груз 9 с перегрузом 8 находятся на высоте h , поэтому потенциальная энергия начального состояния: $E_{n1} = 0 + mgh + m_1gh$. Тогда полная энергия системы в начальный момент:

$$E_1 = (m + m_1)gh. \quad (7.2)$$



Рис. 7.2. Изображение установки

Рассчитаем полную энергию конечного состояния системы. В конечном положении груз 9 с перегрузом 8 находятся на нулевой высоте от уровня столика, а груз 4 на высоте h , поэтому потенциальная энергия конечного состояния системы:

$$E_{n2} = mgh. \quad (7.3)$$

Кинетическая энергия системы в конечном состоянии складывается из кинетических энергий поступательно движущихся грузов 4, 9, перегруза 8 и кинетической энергии вращения легкого блока 7.

$$E_{к2} = 2 \frac{mV^2}{2} + \frac{m_1 V^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (7.4)$$

где $J = \frac{m_{\text{бл}} R^2}{2}$ — момент инерции блока относительно оси, проходящей через центр масс; ω — угловая скорость блока, которую можно выразить через линейную скорость точек, лежащих на его поверхности: $\omega = \frac{V}{R}$. Тогда:

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{m_{\text{бл}} R^2}{2} \frac{V^2}{R^2} = \frac{m_{\text{бл}} V^2}{4}. \quad (7.5)$$

Грузы 4, 9 и перегруз 8 движутся прямолинейно и равноускоренно. Ускорение их поступательного движения определяется по формуле: $a = \frac{2h}{t^2}$. А скорость поступательного движения:

$$V = at = \frac{2h}{t}. \quad (7.6)$$

Подставив формулы (7.5) и (7.6) в выражение (7.4), получим кинетическую энергию конечного состояния:

$$E_{к2} = 2 \cdot \frac{2mh^2}{t^2} + \frac{2m_1 h^2}{t^2} + \frac{m_{\text{бл}} h^2}{t^2} \text{ или } E_{к2} = \frac{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})h^2}{t^2}. \quad (7.7)$$

Тогда, учитывая формулы (7.3) и (7.7), полная энергия системы в конечном состоянии:

$$E_2 = \frac{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})h^2}{t^2} + mgh. \quad (7.8)$$

Рассчитаем работу неконсервативных сил (в нашем случае это силы трения в оси блока машины Атвуда) при вращательном движении:

$$A^{\text{неконс}} = -M_{\text{тр}}\varphi,$$

где $M_{\text{тр}}$ — момент сил трения относительно оси блока машины Атвуда; φ — полный угол поворота блока за время движения.

Угол φ можно найти, измерив путь, пройденный грузом 9. За один оборот блок поворачивается на угол: $\varphi = 2\pi$ радиан, а нить, скрепляющая грузы, перемещается на расстояние: $h = 2\pi R$. За N оборотов угол поворота будет: $\varphi = 2\pi N$ радиан, а расстояние: $h = N \cdot 2\pi R$. Отсюда число оборотов: $N = \frac{h}{2\pi R}$ и полный угол поворота равен: $\varphi = \frac{h}{R}$. Тогда работа силы трения:

$$A_{\text{тр}} = -M_{\text{тр}} \frac{h}{R} = -M_{\text{тр}} \frac{2h}{d}. \quad (7.9)$$

Подставим выражения (7.2, 7.8, 7.9) в закон сохранения энергии (7.1):

$$\frac{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})h^2}{t^2} + mgh - (m + m_1)gh = -M_{\text{тр}} \frac{2h}{d}.$$

После преобразований получим окончательное выражение:

$$\frac{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})h^2}{t^2} - m_1gh = -M_{\text{тр}} \frac{2h}{d}. \quad (7.10)$$

Формула (7.10) выражает общезначимый закон сохранения энергии в форме, удобной для проверки с помощью машины Атвуда.

Программа работы

1. Определить приращение полной механической энергии.
2. Рассчитать работу неконсервативных сил трения.
3. Убедиться в справедливости закона сохранения полной механической энергии.

Порядок работы

1. Записать исходные данные. Они приведены на установке. Рассчитать их абсолютную погрешность как погрешность постоянной величины.

2. Подобрать перегруз массой m_1 . Рассчитать абсолютную погрешность массы Δm_1 как погрешность постоянной величины.

3. Установить верхнюю грань приемного столика II на расстоянии h от нулевого деления шкалы. Оценить абсолютную погрешность измерения высоты Δh по прибору.

4. Нижнюю грань груза 9 с перегрузом 8 установить на нулевое деление шкалы вертикальной линейки и зафиксировать это положение, переключив тумблер 3 в положение «магнит».

5. Измерить время падения груза. Для этого переключить тумблер 3 в положение «секундомер» и нажать на кнопку 12. При касании грузом 9 столика 11 секундомер отключится. Записать показания секундомера. Повторить измерения времени 5 раз. Рассчитать

среднее значение времени: $\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$. Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt по прибору.

6. Рассчитать приращение полной механической энергии

$$E_2 - E_1 = \frac{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})h^2}{t^2} - m_1gh.$$

Определить ее абсолютную погрешность по упрощенной формуле

$$\Delta(E_2 - E_1) = \langle E_2 - E_1 \rangle \sqrt{\frac{(\Delta m)^2 + (\Delta m_1)^2 + (\Delta m_{\text{бл}})^2}{(4m + 2m_1 + m_{\text{бл}})^2} + \left(\frac{2\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}.$$

Записать окончательный результат для приращения энергии: $\Delta E = (\langle E_2 - E_1 \rangle \pm \Delta(E_2 - E_1))$ Дж.

7. Рассчитать работу неконсервативных сил по формуле

$$A_{\text{тр}} = -M_{\text{тр}} \frac{2h}{d}.$$

Определить ее абсолютную погрешность:

$$\Delta A_{\text{тр}} = \langle A_{\text{тр}} \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta M_{\text{тр}}}{M_{\text{тр}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}.$$

Записать окончательный результат: $A_{\text{тр}} = (\langle A_{\text{тр}} \rangle \pm \Delta A_{\text{тр}})$ Дж.

8. Сравнить численные значения величин ΔE и $A_{\text{тр}}$, построив на оси их интервальные значения.

9. Сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?

3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство машины Атвуда.
5. Что называется механической системой?
6. Какие системы называются замкнутыми?
7. Какая система называется диссипативной?
8. Дать определение кинетической энергии. Записать формулу, единицу измерения.
9. Дать определение потенциальной энергии. Записать формулу, единицу измерения.
10. Какие силы называются консервативными? Приведите примеры.
11. Какие силы называются неконсервативными? Приведите примеры.
12. Сформулировать и записать закон сохранения полной механической энергии.
13. Сформулировать и записать теорему о приращении кинетической энергии.
14. Вывести расчетную формулу для приращения полной механической энергии системы.
15. Вывести расчетную формулу работы неконсервативных сил.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
 приращение полной механической энергии и абсолютная погрешность: $E_2 - E_1 =$
 $\Delta E_2 - E_1 =$
 работа неконсервативных сил и ее абсолютная погрешность:
 $A_{\text{тр}} =$ $\Delta A_{\text{тр}} =$
6. Исходные данные:
 момент сил трения: $M_{\text{тр}} =$ $\Delta M_{\text{тр}} =$ $\frac{\Delta M_{\text{тр}}}{M_{\text{тр}}} =$

диаметр блока: $d =$ $\Delta d =$ $\frac{\Delta d}{d} =$

масса блока: $m_{\text{бл}} =$ $\Delta m_{\text{бл}} =$ $\frac{\Delta m_{\text{бл}}}{m_{\text{бл}}} =$

масса груза: $m =$ $\Delta m =$ $\frac{\Delta m}{m} =$

7. Измерения:

масса перегруза: $m_1 =$ $\Delta m_1 =$ $\frac{\Delta m_1}{m_1} =$

высота: $h =$ $\Delta h =$ $\frac{\Delta h}{h} =$

время падения:

№	1	2	3	4	5
$t, \text{с}$					

$\langle t \rangle =$ $\Delta t =$ $\frac{\Delta t}{\langle t \rangle} =$

8. Расчет:

$\langle E_2 - E_1 \rangle =$

$\Delta(E_2 - E_1) =$

Окончательный результат: $\Delta E =$

$\langle A_{\text{тр}} \rangle =$

$\Delta A_{\text{тр}} =$

Окончательный результат: $A_{\text{тр}} =$

9. Сравнение результатов.

10. Вывод.

Учебно-педагогические задания к лабораторной работе М7

Закон сохранения полной механической энергии играет фундаментальную роль в механике. Как правило, его применение к решению задач обоснованно в том случае, если нас не интересуют все стадии и характеристики механического движения, а интересно состояние тела в некоторой точке траектории движения по известным характеристикам начала движения. И здесь важно понимать следующее. Применение закона сохранения полной механической энергии к описанию механической системы должно приводить к тому же результату, что и применение законов Ньютона. В каждом кон-

кретном случае — это вопрос выбора исследователя, не влияющий на конечный результат.

В качестве упражнения предлагается сделать следующие задания.

Задание 18. Через невесомый блок перекинута легкая нить, к разным концам которой привязаны грузы различной массы m_1 и m_2 ($m_2 > m_1$). Это машина Атвуда, известная вам по лабораторной работе 3. Необходимо определить ускорение грузов двумя способами:

- а) используя законы Ньютона;
- б) используя закон сохранения полной механической энергии.

Указание: при выполнении этого задания с использованием закона сохранения полной механической энергии нужно рассмотреть полную механическую энергию в двух состояниях. Первое состояние — грузы находятся на одной высоте, второе состояние — груз массой m_2 опустился на некоторое расстояние, а груз массой m_1 поднялся на то же расстояние. Данный подход предполагает использование кинематического соотношения между начальной V_0 и конечной V скоростью тела, его ускорением a и пройденным расстоянием S в виде: $a = \frac{V^2 - V_0^2}{2S}$. Акцент на важность этого соотношения обычно не делается, но именно оно играет существенную роль при решении некоторых динамических задач с использованием закона сохранения полной механической энергии.

Задание 19. По наклонной плоскости с углом наклона α скользит брусок. Необходимо определить ускорение бруска двумя способами:

- а) используя законы Ньютона;
- б) используя закон сохранения полной механической энергии.

Именно на таких простых примерах и демонстрируется правомерность различных подходов, которые должны приводить к одному и тому же результату. Это очень важный аспект как исследовательской, так и педагогической деятельности.

Лабораторная работа М8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО МАССЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ

Цель работы: экспериментально установить зависимость момента инерции маятника Обербека от распределения его массы относительно оси вращения.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, набор грузов.

Описание установки и метода измерений

Маятник Обербека (рис. 8.1) представляет собой маховик с крестообразными стержнями 2, по которым могут перемещаться и закрепляться в нужном положении цилиндрические грузы 1 одинаковой массы. На оси маховика находятся два шкива 3, 4 различного радиуса. На один из шкивов наматывается нить 5. Нить перекинута через неподвижный блок 6. К концу нити прикреплена площадка 8. При помощи грузов 7 различной массы, помещаемых на площадку, маятник приводится во вращательное движение.

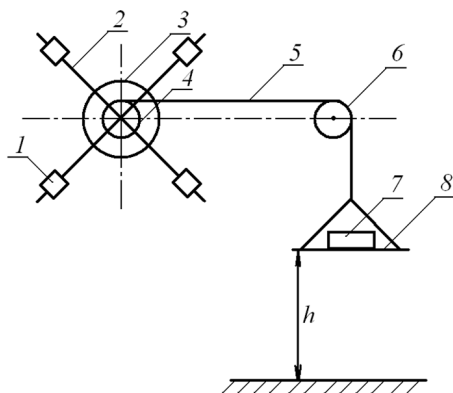


Рис. 8.1. Схема установки: 1 – цилиндрический груз; 2 – стержень; 3 – большой шкив; 4 – малый шкив; 5 – нить; 6 – блок; 7 – груз; 8 – площадка

Основное уравнение динамики вращательного движения:

$$J \cdot \varepsilon = M. \quad (8.1)$$

где J — момент инерции тела относительно оси вращения; ε — его угловое ускорение; M — суммарный момент сил, приложенных к телу.

На маятник Обербека действует сила натяжения нити. Силой трения в оси маятника и силой сопротивления воздуха мы пренебрегаем. Момент силы натяжения нити определяется по формуле

$$M = T \cdot R, \quad (8.2)$$

где T — сила натяжения нити; R — радиус шкива маятника Обербека.

Силу натяжения нити найдем из уравнения динамики поступательного движения груза:

$$ma = mg - T, \quad (8.3)$$

где m — масса груза; a — его ускорение; mg — сила тяжести, действующая на груз. Отсюда сила натяжения нити:

$$T = m(g - a). \quad (8.4)$$

Так как груз движется поступательно с постоянным ускорением без начальной скорости, то его ускорение рассчитывается по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (8.5)$$

где t — время, за которое груз пройдет расстояние h .

Так как нить, на которой подвешен груз, считается нерастяжимой и сматывается со шкива маятника Обербека без проскальзывания, то ускорение опускающегося груза a оказывается равным касательному ускорению a_τ точек, лежащих на поверхности шкива маятника Обербека: $a = a_\tau$.

Касательное ускорение точек вращающегося тела связано с угловым ускорением тела по формуле

$$a_\tau = \varepsilon \cdot R. \quad (8.6)$$

Таким образом, угловое ускорение маятника Обербека можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{R} = \frac{a}{R} = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (8.7)$$

Подставляя выражения (8.2), (8.4), (8.5) и (8.7) в уравнение (8.1) и выразив радиус через диаметр $R = \frac{d}{2}$, получим формулу для определения момента инерции маятника Обербека:

$$J = \frac{1}{4}md^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (8.8)$$

Программа работы

1. Определить моменты инерции маятника Обербека при различных положениях центров масс цилиндрических грузов относительно оси вращения.
2. Построить график зависимости момента инерции маятника от расстояния центров масс цилиндрических грузов до оси вращения.

Порядок работы

1. Измерить штангенциркулем диаметр шкива d . Оценить абсолютную погрешность измерения по прибору.

2. Укрепить цилиндрические грузы на концах стержней маятника Обербека симметрично оси вращения. Расстояние от середины каждого груза до оси вращения маятника должно быть одинаковым. Измерить штангенциркулем это расстояние l_1 .

3. Положить на площадку груз массой m . Записать значение массы груза и оценить ее абсолютную погрешность Δm .

4. Площадку с грузом расположить на высоте h (80–100 см) от уровня пола. Записать значение высоты и оценить абсолютную погрешность измерения высоты Δh по прибору.

5. Определить 3 раза время опускания груза с заданной высоты. Найти среднее значение времени. Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt по прибору.

6. Рассчитать момент инерции маятника Обербека по формуле

$$J = \frac{1}{4}md^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right).$$

7. Оценить его абсолютную погрешность по упрощенной формуле

$$\Delta J = \langle J \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность $\delta = \frac{\Delta J_1}{\langle J_1 \rangle} \cdot 100\%$.

Записать окончательный результат $J_1 = (\langle J_1 \rangle \pm \Delta J)$ кг · м².

8. Закрепить все грузы на стержнях в новом положении ближе к оси маятника. Измерить расстояние l_2 от середины грузов до оси вращения. Повторить пункты 5, 6.

9. Определить момент инерции маятника еще для четырех положений грузов, каждый раз приближая их к оси вращения.

10. На миллиметровой бумаге построить график зависимости момента инерции маятника от расстояния центров масс грузов до оси вращения $I = f(l)$.

11. Сделать вывод о характере зависимости момента инерции тела от распределения его массы относительно оси вращения.

Вопросы для самоконтроля

3. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
4. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
5. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
6. Описать устройство машины Атвуда.
7. Как в лабораторной работе изменяется момент инерции маятника Обербека?
8. Как графически должна выглядеть зависимость момента инерции тела от распределения его массы относительно оси вращения?
9. Какое движение называется вращательным?
10. Записать основное уравнение динамики вращательного движения с пояснением всех входящих в него физических величин.
11. Что называется моментом инерции тела относительно оси вращения? От каких величин зависит момент инерции тела?
12. Как определяется момент инерции тела правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс?

13. Как определяется момент инерции тела относительно оси, не проходящей через центр масс?
14. Сформулировать и записать теорему Штейнера.
15. Дать определение момента силы.
16. Дать определение углового ускорения. Изобразить на рисунке вектор углового ускорения.
17. Вывод расчетной формулы момента инерции маятника Обербека I .

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
момент инерции маятника Обербека и его абсолютная погрешность:

$$J =$$

$$\Delta J =$$

6. Исходные данные:

масса груза:

$$m =$$

$$\Delta m =$$

ускорение свободного падения: $g =$

$$\Delta g =$$

7. Измерения:

диаметр шкива:

$$d =$$

$$\Delta d =$$

пройденное грузом расстояние: $h =$

$$\Delta h =$$

Таблица результатов наблюдений и вычислений:

№	Расстояние от середины грузов маятника до его оси вращения l , м	Время опускания груза				Момент инерции маятника I , кг · м ²
		t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	$\langle t \rangle$, с	
1						
2						
3						
4						
5						

Абсолютная погрешность секундомера $\lambda =$

$$\Delta t =$$

8. Расчет:

$$\langle J_1 \rangle =$$

$$\Delta J_1 =$$

$$\delta = \frac{\Delta J_1}{\langle J_1 \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $J_1 =$

9. График $J = f(l)$ на миллиметровой бумаге.

10. Вывод.

Лабораторная работа М9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: изучение вращательного движения и определение момента инерции тела методом крутильных колебаний.

Приборы и принадлежности: крутильный маятник, тело неопределенной формы, секундомер, штангенциркуль.

Описание установки и метода измерений

Крутильный маятник (рис. 9.1) состоит из стального диска 2, подвешенного на вертикальной упругой металлической проволоке 1. Нижний конец проволоки проходит через центр масс диска, а верхний конец закреплен в точке подвеса кронштейна. Под диском на продолжении его оси вращения имеется винт для крепления тела неопределенной формы 3, момент инерции которого требуется определить.

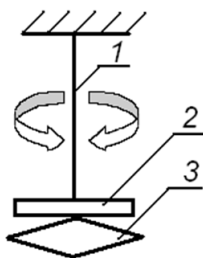


Рис. 9.1. Схема установки:

1 – металлическая проволока; 2 – стальной диск;
3 – исследуемое тело неопределенной формы

Если крутильный маятник повернуть на небольшой угол вокруг вертикальной оси и отпустить, то маятник под действием возникающих в проволоке упругих сил будет совершать гармонические крутильные колебания.

При гармонических крутильных колебаниях маятника потенциальная энергия упругой деформации закрученной проволоки переходит в кинетическую энергию вращательного движения маятника относительно вертикальной оси. Затем кинетическая энергия вра-

щательного движения маятника переходит в потенциальную энергию, равную работе по закручиванию проволоки.

Воспользуемся основным законом динамики вращательного движения:

$$M = I\varepsilon, \quad (9.1)$$

где M – момент сил; I – момент инерции маятника относительно оси вращения; ε – его угловое ускорение.

На основании закона Гука момент упругих сил проволоки M пропорционален углу поворота α маятника:

$$M = -k\alpha, \quad (9.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый модулем кручения.

Угловое ускорение находится как вторая производная угла поворота по времени:

$$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}. \quad (9.3)$$

С учетом выражений (9.2) и (9.3) уравнение (9.1) примет вид:

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + k\alpha = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{k}{I}\alpha = 0.$$

Это дифференциальное уравнение гармонических колебаний, общий вид которого: $\frac{d^2S}{dt^2} + \omega^2 S = 0$. Решением такого уравнения является выражение: $S = A \cos(\omega t + \varphi)$.

В нашем случае решение дифференциального уравнения имеет вид: $\alpha = \alpha_0 \cos \sqrt{\frac{k}{I}} \cdot t$. Величина $\sqrt{\frac{k}{I}}$ в этом выражении играет роль круговой частоты ω .

Период крутильных колебаний маятника выразим через круговую частоту: $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}$.

Для определения момента инерции какого-либо тела неопределенной формы необходимо дополнительно иметь тело, момент инерции которого известен.

В данной работе в качестве тела с известным моментом инерции используется диск. Момент инерции диска относительно оси, проходящей через центр масс, рассчитывается по формуле

$$I_0 = \frac{mR^2}{2} = \frac{md^2}{8}, \quad (9.4)$$

где m — масса диска; R — радиус диска.

Период крутильных колебаний диска найдем по формуле

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0}{k}}. \quad (9.5)$$

Если под диск (рис. 9.1) симметрично оси колебаний прикрутить тело неопределенной формы, то период крутильных колебаний такой системы скрепленных тел:

$$T_{0x} = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + I_x}{k}}. \quad (9.6)$$

Из формул (9.5) и (9.6) находим выражение для вычисления момента инерции тела неопределенной формы:

$$I_x = I_0 \frac{T_0^2 - T_{0x}^2}{T_{0x}^2}. \quad (9.7)$$

Определив опытным путем периоды T_0 и T_{0x} , можно вычислить момент инерции исследуемого тела.

Программа работы

1. Определение момента инерции диска.
2. Определение момента инерции тела неопределенной формы.

Порядок работы

1. Измерить штангенциркулем диаметр диска d . Оценить абсолютную погрешность измерения по прибору.

2. Записать массу m диска (она указана на диске). Оценить абсолютную погрешность массы Δm как погрешность постоянной величины.

3. Положить на площадку груз массой m . Записать значение массы груза и оценить ее абсолютную погрешность Δm .

4. Определить момент инерции однородного диска по формуле

$$I_0 = \frac{md^2}{8}.$$

Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta I_0 = I_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2}.$$

5. Сообщить диску крутильные колебания, повернув его относительно вертикальной оси на $10\text{--}15^\circ$. Определить секундомером время 10 колебаний. Опыт повторить 5 раз.

6. Вычислить среднее время колебаний диска:

$$\langle t_0 \rangle = \frac{\sum t_i}{N}.$$

Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt_0 по секундомеру.

7. Определить период крутильных колебаний диска:

$$\langle T_0 \rangle = \frac{\langle t_0 \rangle}{N}.$$

Записать абсолютную погрешность периода $\Delta T_0 = \Delta t_0$.

8. Укрепить под диском тело неопределенной формы. Сообщить системе скрепленных тел крутильные колебания. Определить секундомером время 10 колебаний. Опыт повторить 5 раз.

9. Вычислить среднее время колебаний системы тел:

$$\langle t_{0x} \rangle = \frac{\sum t_i}{N}.$$

Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt_{0x} по секундомеру.

10. Определить период крутильных колебаний системы двух тел:

$$\langle T_{0x} \rangle = \frac{\langle t_{0x} \rangle}{N}.$$

Записать абсолютную погрешность периода $\Delta T_{0x} = \Delta t_{0x}$.

11. Вычислить момент инерции тела неопределенной формы по формуле $I_x = I_0 \frac{T_{0x}^2 - T_0^2}{T_0^2}$.

12. Рассчитать его абсолютную погрешность по упрощенной формуле

$$\Delta I_x = \langle I_x \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T_{0x}}{\langle T_{0x} \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T_0}{\langle T_0 \rangle}\right)^2}.$$

13. Записать окончательный результат: $I_x = (\langle I_x \rangle \pm \Delta I_x)$ кг · м².

14. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство крутильного маятника.
5. В чем суть метода крутильных колебаний маятника, с помощью которого определялся момент инерции тела неопределенной формы?
6. Какое движение называется вращательным?
7. Записать основное уравнение динамики вращательного движения с пояснением всех входящих в него физических величин.
8. Что называется моментом инерции тела относительно оси вращения? От каких величин зависит момент инерции тела?
9. Как определяется момент инерции тела правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс?
10. Как определяется момент инерции тела относительно оси, не проходящей через центр масс?
11. Сформулировать и записать теорему Штейнера.
12. Дать определение момента силы относительно оси вращения. Записать формулу, единицу измерения.
13. Дать определение углового ускорения. Изобразить на рисунке вектор углового ускорения.
14. Записать формулу периода крутильных колебаний маятника и пояснить входящие в нее величины.
15. Вывод расчетной формулы момента инерции тела неопределенной формы.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

момент инерции диска и его абсолютная погрешность:

$$I_0 = \quad \quad \quad \Delta I_0 =$$

момент инерции тела неопределенной формы, абсолютная погрешность:

$$I_x = \quad \quad \quad \Delta I_x =$$

6. Исходные данные:

масса диска: $m =$ $\Delta m =$ $\frac{\Delta m}{m} =$

7. Измерения:

диаметр диска: $d =$ $\Delta d =$ $\frac{\Delta d}{d} =$

Таблица результатов измерений:

	1	2	3	4	5
Время крутильных колебаний диска t_0 , с					
Время крутильных колебаний системы скрепленных тел t_{0x} , с					

$$\begin{aligned} \langle t_0 \rangle = & \quad \quad \quad \langle t_{0x} \rangle = & \quad \quad \quad \Delta t_0 = \Delta t_{0x} = \\ \langle T_0 \rangle = & \quad \quad \quad \langle T_{0x} \rangle = & \quad \quad \quad \Delta T_0 = \Delta T_{0x} = \end{aligned}$$

8. Расчет:

$$\begin{aligned} I_0 &= \\ \Delta I_0 &= \\ \langle I_x \rangle &= \\ \Delta I_x &= \end{aligned}$$

Окончательный результат: $I_x =$

9. Вывод.

Лабораторная работа М10

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: изучить вращательное движение маятника Обербека; определить динамические характеристики: момент инерции и момент силы.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, набор грузов.

Описание установки и метода измерений

Маятник Обербека (рис. 10.1) представляет собой маховик с крестообразными стержнями 2, по которым могут перемещаться и закрепляться в нужном положении цилиндрические грузы 1 одинаковой массы. На оси маховика находятся два шкива 3, 4 различного радиуса. На один из шкивов наматывается нить 5. Нить перекинута через неподвижный блок 6. К концу нити прикреплена площадка 8. При помощи грузов 7 различной массы, помещаемых на площадку, маятник приводится во вращательное движение.

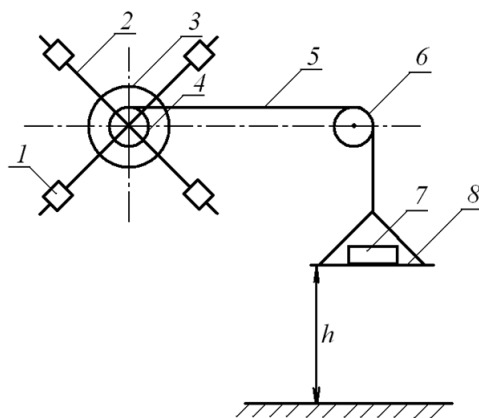


Рис. 10.1. Схема установки:
1 – цилиндрический груз; 2 – стержень;
3 – большой шкив; 4 – малый шкив; 5 – нить; 6 – блок;
7 – груз; 8 – площадка

Основное уравнение динамики вращательного движения:

$$I\varepsilon = M, \quad (10.1)$$

где I – момент инерции тела относительно оси вращения; ε – его угловое ускорение; M – суммарный момент сил, приложенных к телу.

На маятник Обербека действует сила натяжения нити. Силой трения в оси маятника и силой сопротивления воздуха мы пренебрегаем. Момент силы натяжения нити определяется по формуле

$$M = TR, \quad (10.2)$$

где T – сила натяжения нити; R – радиус шкива маятника Обербека.

Силу натяжения нити найдем из уравнения динамики поступательного движения груза:

$$ma = mg - T, \quad (10.3)$$

где m – масса груза; a – его ускорение; mg – сила тяжести, действующая на груз. Отсюда сила натяжения нити:

$$T = m(g - a). \quad (10.4)$$

Так как груз движется поступательно с постоянным ускорением без начальной скорости, то его ускорение рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (10.5)$$

где t – время, за которое груз пройдет расстояние h .

Так как нить, на которой подвешен груз, считается нерастяжимой и сматывается со шкива маятника Обербека без проскальзывания, то ускорение опускающегося груза a оказывается равным касательному ускорению a_τ точек, лежащих на поверхности шкива маятника Обербека: $a = a_\tau$.

Касательное ускорение точек вращающегося тела связано с угловым ускорением тела по формуле:

$$a_\tau = \varepsilon R. \quad (10.6)$$

Таким образом, угловое ускорение маятника Обербека можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{R} = \frac{a}{R} = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (10.7)$$

Подставляя выражения (10.2), (10.4), (10.5) и (10.7) в уравнение (10.1) и выразив радиус через диаметр $R = \frac{d}{2}$, получим формулу для определения момента инерции маятника Обербека:

$$I = \frac{1}{4}md^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (10.8)$$

Подставляя выражения (10.4) и (10.5) в формулу (10.2), получим расчетную формулу вращающего момента:

$$M = \frac{1}{2}md \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (10.9)$$

Программа работы

1. Определить момент инерции маятника Обербека.
2. Определить вращающий момент.

Порядок работы

1. Измерить штангенциркулем диаметр шкива d . Оценить абсолютную погрешность измерения по прибору.

2. Укрепить цилиндрические грузы на концах стержней маятника Обербека симметрично оси вращения. Расстояние от середины каждого груза до оси вращения маятника должно быть одинаковым.

3. Положить на площадку груз массой m . Записать значение массы груза и оценить ее абсолютную погрешность Δm .

4. Площадку с грузом расположить на высоте h (80–100 см) от уровня пола. Записать значение высоты и оценить абсолютную погрешность измерения высоты Δh по прибору.

5. Определить 6 раз время опускания груза с заданной высоты. Найти среднее значение времени. Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt по методу Стьюдента.

6. Рассчитать момент инерции маятника Обербека по формуле

$$I = \frac{1}{4}md^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right).$$

Рассчитать абсолютную погрешность момента инерции по упрощенной формуле:

$$\Delta I = \langle I \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2}.$$

Рассчитать его относительную погрешность: $\frac{\Delta I}{\langle I \rangle} \cdot 100\%$.

Записать окончательный результат: $I = (\langle I \rangle \pm \Delta I) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

7. Рассчитать вращающий момент по формуле

$$M = \frac{1}{2}md \left(g - \frac{2h}{t^2} \right).$$

Рассчитать его абсолютную погрешность по упрощенной формуле:

$$\Delta M = \langle M \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2}.$$

Рассчитать относительную погрешность: $\frac{\Delta M}{\langle M \rangle} \cdot 100\%$.

Записать окончательный результат: $M = (\langle M \rangle \pm \Delta M) \text{ Н} \cdot \text{м}$.

8. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем прямых измерений? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в данной лабораторной работе определяются путем косвенных измерений? Какие формулы используются для этого?
4. Описать устройство маятника Обербека.
5. Какое движение совершает маятник Обербека? Какие характеристики этого движения определяются в работе?
6. Какая сила создает вращательный момент маятника Обербека?
7. Какое движение называется вращательным?
8. Записать основное уравнение динамики вращательного движения.
9. Что называется моментом инерции тела относительно оси вращения? От каких величин зависит момент инерции тела?
10. Как определяется момент инерции тела правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс?
11. Как определяется момент инерции тела относительно оси, не проходящей через центр масс? Сформулировать и записать теорему Штейнера.

12. Дать определение момента силы. Записать формулу, единицу измерения, изобразить вектор момента силы на рисунке.
13. Что называется вращающим моментом?
14. Какая сила приводит тело к вращению?
15. Вывод расчетных формул момента инерции маятника Обербека I и вращательного момента M .

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
момент инерции маятника Обербека и его абсолютная погрешность:

$$I = \quad \quad \quad \Delta I =$$

вращающий момент и его абсолютная погрешность:

$$M = \quad \quad \quad \Delta M =$$

6. Исходные данные:

$$\text{масса груза: } m = \quad \quad \quad \Delta m =$$

$$\text{ускорение свободного падения: } g = \quad \quad \quad \Delta g =$$

7. Измерения:

$$\text{диаметр шкива: } d = \quad \quad \quad \Delta d =$$

$$\text{пройденное грузом расстояние: } h = \quad \quad \quad \Delta h =$$

$$\text{расстояние от середины груза до оси вращения: } l_1 =$$

время опускания груза:

№	t_i, c	$\Delta t_i, \text{c}$	Δt_i^2
1			
2			
3			
4			
5			
6			

$$\langle t \rangle =$$

$$\Sigma \Delta t_i^2 =$$

Погрешность секундомера: $\lambda =$

Оценка среднеквадратичного отклонения: $S =$

Коэффициент Стьюдента: $t_{cr}(P = 0,95; N =) =$

Случайная погрешность: $\alpha =$

Абсолютная погрешность: $\Delta t =$

Относительная погрешность: $\frac{\Delta t}{\langle t \rangle} =$

8. Расчет момента инерции маятника Обербека:

$\langle I \rangle =$

$\Delta I =$

$\delta = \frac{\Delta I}{\langle I \rangle} \cdot 100 \% =$

Окончательный результат: $I =$

9. Расчет вращающего момента:

$\langle M \rangle =$

$\Delta M =$

$\delta = \frac{\Delta M}{\langle M \rangle} \cdot 100 \% =$

Окончательный результат: $M =$

10. Вывод.

Учебно-педагогические задания к лабораторным работам М8–10

В данных лабораторных работах вводится новое физическое понятие, которое не входит в программу средней школы, – момент инерции. Тем не менее, физический смысл данного понятия очевиден. Если масса – мера инертности тела при поступательном движении, то момент инерции – мера инертности тела при вращательном движении. И в этом смысле аналитические формы второго закона Ньютона для вращательного движения, а также кинетическая энергия вращательно движущегося тела функционально повторяют аналогичные формы для поступательного движения.

Для понимания роли момента инерции в описании вращательного движения предлагается выполнить следующие задания.

Задание 20. Через блок массы M и радиуса R перекинута легкая нить, к разным концам которой привязаны грузы различной массы m_1 и m_2 ($m_2 > m_1$). Необходимо определить ускорение грузов двумя способами:

- а) используя законы Ньютона;
- б) используя закон сохранения полной механической энергии.

Задание 21. По наклонной плоскости с углом наклона α скатывается однородный цилиндр массы M и радиуса R . Необходимо определить ускорение цилиндра двумя способами:

- а) используя законы Ньютона;
- б) используя закон сохранения полной механической энергии.

Введение вращательного движения в эти простые задачи должно также продемонстрировать правомерность различных подходов, которые должны приводить к одному и тому же результату несмотря на усложнение аналитических вычислений.

Библиографический список

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. Учебное пособие. Том 1. Механика = A Course in General Physics. Vol. 1. Mechanics / И. В. Савельев. — Изд. 7-е, стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2022. — 336. — (Классическая учебная литература по физике). — URL: e.lanbook.com/book/187811 (дата обращения: 15.09.2023). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-8114-9196-4.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова. — 19-е изд., стер. — Москва : Академия, 2012. — 557, [1] с. — (Высшее профессиональное образование). — ISBN 978-5-7695-9433-5.
3. Трофимова, Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т. И. Трофимова. — Москва : Астрель [и др.], 2005. — 400 с. — ISBN 5-17-028261-3.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Учебное пособие. Том 1. Механика / Д. В. Сивухин. — Изд. 4-е, стер. — Москва : Физматлит [и др.], 2005. — 560 с. — ISBN 5-9221-0225-7.
5. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. — 7-е изд., стер. — Москва : Академия, 2008. — 720 с. — (Высшее профессиональное образование). — ISBN 978-5-7695-4875-8.
6. Яворский, Б. М. Справочник по физике : для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. — 8-е изд., перераб. и испр. — Москва : Оникс [и др.], [2008]. — 1054 с. — ISBN 978-5-488-01477-0. — ISBN 978-985-16-4694-0.
7. Чертов, А. Г. Физические величины : (Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) : справочное пособие / А. Г. Чертов. — Москва : Высшая школа, 1990. — 335 с.
8. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для студентов вузов / А. С. Ахматов, В. М. Андреевский, А. И. Кулаков [и др.] ; под ред. А. С. Ахматова. — Москва : Высшая школа, 1980. — 360 с.
9. Сарафанова, В. А. Лабораторный практикум по физике. В 3 частях. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика / В. А. Сарафанова, С. Н. Потемкина, И. С. Ясников ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2018. — 136 с. — URL: dspace.tltsu.ru/handle/123456789/8821 (дата обращения: 15.09.2023). — ISBN 978-5-8259-1407-7.

Пример оформления отчета о лабораторной работе

Тольяттинский государственный университет
Кафедра «Общая и теоретическая физика»

Группа ПО-2208а

Студент Иванов И.И.

Преподаватель Петров П.П.

ОТЧЕТ

о лабораторной работе М1

«Оценка измеряемой физической величины
с помощью доверительного интервала»

К работе допущен:

Работа выполнена:

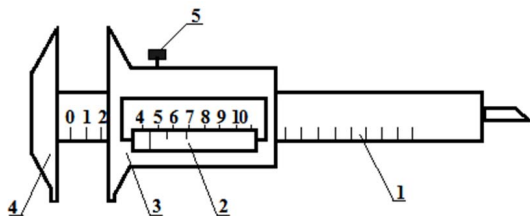
Теория зачтена:

Тольятти 2024

Цель работы: усвоить методику обработки результатов прямых измерений.

Приборы и принадлежности: штангенциркуль, цилиндрическое тело.

Схема установки:



1 – штанга; 2 – нониус; 3, 4 – измерительные выступы; 5 – зажимный винт

Измерение высоты цилиндрического тела:

Погрешность штангенциркуля: $\lambda = 0,1$ мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8
h , мм	90,5	90,8	91,1	90,4	90,8	92,0	90,6	90,2

Исключение грубых погрешностей:

Ранжирование: 90,2; 90,4; 90,5; 90,6; 90,8; 90,8; 91,1; 92,0 (мм).

Размах $R = 92,0 - 90,2 = 1,8$ (мм).

Расчет отношений:

$$Q_1 = \frac{h_2 - h_1}{R} = \frac{90,4 - 90,2}{1,8} = 0,111 \quad Q_2 = \frac{h_8 - h_7}{R} = \frac{92,0 - 91,1}{1,8} = 0,500$$

Табличное значение ($P = 0,95$; $N = 8$) $Q_T = 0,468$.

Сравнение отношений и вывод: так как $Q_1 < Q_T$, то результат измерения $h_1 = 90,2$ не содержит грубую погрешность и участвует в дальнейшей обработке по методу Стьюдента. Так как $Q_2 < Q_T$, то результат измерения $h_8 = 92,0$ содержит грубую погрешность и его необходимо исключить из дальнейших расчетов.

Обработка результатов измерений высоты по методу Стьюдента:

№	h_i , мм	$\Delta h_i = \langle h \rangle - h_i$, мм	$(\Delta h_i)^2$, мм ²
1	90,2	-0,43	0,1849
2	90,4	-0,23	0,0529
3	90,5	-0,13	0,0169
4	90,6	-0,03	0,0009
5	90,8	0,17	0,0289
6	90,8	0,17	0,0289
7	91,1	0,47	0,2209
8	—	—	—
$\langle h \rangle = \frac{\sum h_i}{N} = \frac{634,4}{7} = 90,63 \text{ (мм)}$			$\sum (\Delta h_i)^2 = 0,5343 \text{ (мм}^2\text{)}$

Оценка среднеквадратичного отклонения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta h_i)^2}{N(N-1)}} = \sqrt{\frac{0,5343}{7 \cdot 6}} = 0,1128$$

Коэффициент Стьюдента ($P = 0,95; N = 7$) $t_{\text{ст}} = 2,45$

Случайная погрешность:

$$\alpha = t_{\text{ст}} \cdot S = 2,45 \cdot 0,1128 = 0,276 \text{ (мм)}$$

Абсолютная погрешность:

$$\Delta h = \alpha + \lambda = 0,276 + 0,1 = 0,376 \approx 0,4 \text{ (мм)}$$

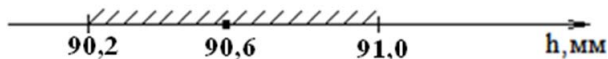
Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} \cdot 100\% = \frac{0,4}{90,6} \cdot 100\% = 0,4\%$$

Окончательный результат:

$$h = (90,6 \pm 0,4) \text{ мм} = (9,06 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Построение доверительного интервала:



Вывод: в данной лабораторной работе я научился проводить измерения штангенциркулем, применил метод Стьюдента для определения абсолютной погрешности измерений высоты, оценил с помощью доверительного интервала высоту цилиндрического тела.

1. Математические формулы

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta ;$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha ;$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta ;$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha ;$$

$$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1} ;$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2} ;$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}} ;$$

$$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x ;$$

$$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x} ;$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x} ;$$

$$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x ;$$

$$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x ;$$

$$\int u dv = uv - \int v du ;$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1) ;$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x ;$$

$$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x} ;$$

$$\int \sin x dx = -\cos x ;$$

$$\int \cos x dx = \sin x ;$$

$$\int e^x dx = e^x ;$$

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n! ;$$

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}} ;$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a} ;$$

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2} a^{-2} ;$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6} ;$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15} .$$

3. Десятичные приставки к названиям единиц

Т – тера (10^{12})

д – деци (10^{-1})

н – нано (10^{-9})

Г – гига (10^9)

с – санти (10^{-2})

п – пико (10^{-12})

М – мега (10^6)

м – милли (10^{-3})

ф – фемто (10^{-15})

к – кило (10^3)

мк – микро (10^{-6})

а – атто (10^{-18})

4. Внесистемные величины

$$1 \text{ час} = 3600 \text{ с}$$

$$1 \text{ сут} = 86400 \text{ с}$$

$$1 \text{ год} = 365,25 \text{ сут} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$$

$$1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$$

$$1' = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$$

$$1'' = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

5. Основные физические постоянные

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Скорость распространения света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m_e} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$