

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению практических занятий
по дисциплине «Физика»

Направление подготовки	18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль)	Химическая технология синтетических биологически активных веществ, химико-фармацевтических препаратов и косметических средств
Год начала обучения	2026
Форма обучения	очная
Реализуется в семестре	2

Содержание	
Введение	3
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	4
	6
Тема 1. Основы кинематики.	13
Лабораторная работа 1. Равноускоренное движение.	
Кинематическое движение	20
Тема 2. Механика	
Лабораторная работа 2. Вращательное движение с равномерным ускорением	
Тема 3. Колебания и волны.	26
Лабораторная работа 3. Исследование законов механических колебаний с помощью крутильного маятника поля	
Тема 4. Молекулярная физика и основы термодинамика.	35
Лабораторная работа 4. Увеличение внутренней энергии за счет механической работы.	
Лабораторная работа 5. Исследование идеальных газов	40
Список литературы	48

ВВЕДЕНИЕ

Назначение: оценивание уровня сформированности компетенций обучающихся, определенных программой дисциплины « Физика».

Настоящее издание является методическими указаниями для студентов бакалавриата и предназначено для организации их практической работы по разделам курса ФИЗИКА, разделы: «Механика», «Колебания и волны», «Молекулярная физика и основы термодинамики». В методических указаниях приведены основные формулы и законы, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, варианты задач для работы на аудиторных занятиях, рекомендованная литература.

Если студент испытывает затруднения в освоении теоретического или практического материала, то он может получить устную или письменную консультацию у преподавателя.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ДЛЯ УЧАЩИХСЯ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для всех учащихся, работающих в лаборатории.
2. Учащиеся могут находиться в кабинете только в присутствии преподавателя; пребывание учащихся в помещении лаборантской не допускается.
3. Присутствие посторонних лиц в лаборатории во время эксперимента допускается только с разрешения учителя.
4. В лаборатории запрещается принимать пищу и напитки.
5. Учащимся запрещается выносить из лаборатории и вносить в нее любое оборудование без разрешения учителя.
6. Не допускается загромождение проходов портфелями и сумками.
7. Во время работы в лаборатории учащиеся должны соблюдать чистоту, порядок на рабочем месте, а также четко следовать правилам техники безопасности.
8. Учащимся запрещается бегать по лаборатории, шуметь и устраивать игры.
9. Не допускается нахождение учащихся в лаборатории во время его проветривания.
10. Учащимся запрещается производить самостоятельно, без лаборанта (инженера, преподавателя), сборку (разборку), включение (отключение) схем, приборов, оборудования;

II. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. На рабочем месте должно находиться только оборудование для конкретной работы. Беспорядок на рабочем месте недопустим.
2. В лаборатории одежда сотрудника и студента должна быть застегнута на все застёжки так, чтобы не было развевающихся концов. Длинные волосы должны быть

убраны под головной убор. Работать в легкой обуви (тапочки, босоножки), особенно в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных запрещено.

3. Убрать посторонние и неиспользуемые в данной работе предметы (оборудование), не загромождать ими проходы, освободить подходы к электрическим силовым щитам и другой аппаратуре, своевременно очищать помещение от отходов и мусора;

4. Учащиеся, имеющие длинные волосы, не должны оставлять их в распущенном виде, чтобы исключить возможность их соприкосновения с лабораторным оборудованием, реактивами и тем более — с открытым огнем.

5. Прежде, чем приступить к выполнению эксперимента, учащиеся должны по методическим указаниям изучить и уяснить порядок выполнения предстоящей работы.

6. Учащиеся обязаны внимательно выслушать инструктаж преподавателя по технике безопасности в соответствии с особенностями предстоящей работы. Текущий инструктаж по технике безопасности перед практической работой регистрируется, собственноручно учащимися в тетрадях для практических работ. Текущий инструктаж перед лабораторной работой не регистрируется.

7. Приступать к проведению эксперимента учащиеся могут только с разрешения преподавателя.

III. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

1. Во время работы в лаборатории учащиеся должны быть максимально внимательными, дисциплинированными, строго следовать указаниям преподавателя, соблюдать тишину, поддерживать чистоту и порядок на рабочем месте.

2. Во время демонстрационных опытов учащиеся должны находиться на своих рабочих местах или пересесть по указанию преподавателя на другое, более безопасное место.

3. Следует выполнять только ту работу, на выполнение которой получено разрешение, а также выполнять требования Правил пожарной безопасности и надписей (знаков) безопасности.

4. Никакие вещества в лаборатории нельзя пробовать на вкус! Нюхать вещества можно, лишь осторожно направляя на себя их пары или газы лёгким движением руки, а не наклоняясь к сосуду и не вдыхая полной грудью.

5. При выполнении лабораторных работ учащиеся должны точно повторять действия преподавателя, показывающего, как нужно правильно проводить эксперимент.

6. Подготовленный к работе прибор учащиеся должны показать преподавателю или лаборанту.

7. По первому требованию преподавателя учащиеся обязаны немедленно прекратить выполнение работы (эксперимента). Возобновление работы возможно только с разрешения преподавателя.

8. Учащимся запрещается самостоятельно проводить любые опыты, не предусмотренные в данной работе.

9. Обо всех неполадках в работе оборудования, водопровода, электросети и т.п. учащиеся обязаны сообщить учителю или лаборанту. Учащимся запрещается самостоятельно устранять неисправности.

10. При получении травм (порезы, ожоги и т.п.), а также при плохом самочувствии учащиеся должны немедленно сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

11. Во время работы учащимся запрещается переходить на другое рабочее место без разрешения преподавателя.

12. Учащимся запрещается брать вещества и какое-либо оборудование с незадействованных на данный момент рабочих мест.

13. Недопустимо во время работы перебрасывать друг другу какие-либо вещи (учебники, тетради, ручки и др.).

14. Запрещается оставлять без присмотра включенные нагревательные приборы, а также зажигать горелки и спиртовки без надобности.

IV. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ

1. Уборка рабочих мест по окончании работы производится в соответствии с указаниями преподавателя.
2. Учащиеся должны привести в порядок свое рабочее место, сдать преподавателю или лаборанту дополнительные реактивы и оборудование.
3. По окончании лабораторной и практической работ учащиеся обязаны вымыть руки с мылом.

V. АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ

При возникновении аварийных ситуаций во время занятий в лаборатории (пожар, появление посторонних запахов), не допускать паники и подчиняться только указаниям преподавателя.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ОБОРУДОВАНИЕМ

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.
- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.
- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.
- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.
- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.
- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.
- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.
- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.
- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)
- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Физика – наука экспериментальная. Каждый эксперимент заканчивается измерением, где под «измерением» понимается процесс сравнения данной величины с другой, принятой за единицу измерения (эталон).

В результате эксперимента подтверждаются или опровергаются физические теории, накапливаются знания в той или иной области науки, выявляются физические закономерности в различных процессах и явлениях.

Вследствие этого лабораторный практикум по физике является неотъемлемой частью учебного процесса при изучении общего курса физики в высшем учебном заведении. Первая задача лабораторного практикума – студенты должны познакомиться с применением экспериментальных методов для изучения фундаментальных законов физики, для решения некоторых прикладных задач.

Второй, не менее важной, задачей лабораторного практикума по физике является обучение студентов работе с различными измерительными приборами, обработке результатов, полученных при измерениях, а также оценке точности или достоверности полученного результата, выбору правильного метода проводимых измерений.

По окончании изучения курса физики студент не только получит базовые знания для изучения других дисциплин, но и навыки работы с достаточно сложным оборудованием, знания и навыки, необходимые специалисту с высшим образованием в его производственной деятельности.

ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения, при которых получают непосредственно значения измеряемой величины, называются прямыми.

Пример: линейкой измеряют длину предмета; с помощью весов измеряют массу предмета.

Если для определения искомой величины требуется провести математические действия над результатами прямых измерений, то такие измерения называются косвенными.

Пример: определение скорости по известному пути и времени; определение плотности тела по известной массе и объему (измерение объема может являться и прямым, и косвенным измерением).

Виды ошибок при измерениях

Как непреложную истину следует запомнить: физическую величину нельзя измерить абсолютно точно. При измерении мы всегда допускаем большую или меньшую ошибку. Поэтому при физических измерениях важно определить не только физическую величину, но и ошибку, допускаемую при ее определении.

Ошибки систематические, случайные, промахи

Какие же ошибки могут быть допущены при измерениях? Различают три основных типа ошибок: систематические, случайные, промахи.

Систематические ошибки – ошибки, обусловленные действием какого-либо постоянного фактора (неточность изготовления приборов, неправильный выбор метода измерений).

Пример. При измерениях не учитывается тепловое расширение тел, дефект при изготовлении приборов (штрихи на линейке нанесены неравномерно). При вычислениях с числом "П" считают, что число "П" равно: 3; 3,1; 3,14 вместо 3,14159265.

Таким образом, систематические ошибки вызваны действием вполне определенных факторов, которые могут быть учтены и исключены. Но на практике решение этой проблемы оказывается достаточно сложным делом.

Случайные ошибки — ошибки, связанные с действием внешних факторов, которые не одинаковы для каждого опыта и не могут быть учтены,

Пример. При считывании показаний по шкале величина считываемого результата зависит от положения глаза наблюдателя по отношению к стрелке, которое может изменяться в каждом эксперименте.

Случайные ошибки нельзя учесть, но их действие можно уменьшить, проводя не одно, а несколько измерений, и чем более точно мы хотим провести измерение, тем большее число опытов мы должны проделать. При этом следует иметь в виду, что если случайная ошибка окажется значительно меньше систематической, то не имеет смысла уменьшать случайную ошибку.

Промахи — ошибки, допущенные экспериментатором вследствие недостатка внимания. Этот вид ошибок исчезает при тщательной и аккуратной записи результатов, их обработке и при внимательном считывании показаний приборов.

Приборная ошибка

Особо следует отметить понятие "приборная ошибка" — это ошибка, вносимая прибором в измерение. Эта ошибка может быть как систематической (неправильная установка прибора, неверный режим использования, класс прибора, влияние какого-либо постоянного внешнего фактора), так и случайной (воздействие случайных внешних факторов — сотрясение, нерегулярно проявляющиеся внутренние особенности данного прибора, например, при плавном изменении силы тока прибор покажет одно значение, а при скачкообразном (вследствие трения) — возможно другое значение). Поэтому при всех измерениях необходимо учитывать приборную ошибку, в особенности необходимо обращать внимание на класс точности прибора. Класс точности определяет минимально возможную ошибку (следовательно, максимально возможную точность) при работе с данным прибором.

Абсолютная и относительная ошибки

При проведении физических экспериментов в научных лабораториях требуется достижение наибольшей возможной точности. Поэтому обработке результатов уделяется большое внимание. Существуют сложные теоретические расчеты, позволяющие достаточно точно определить точность измерения. Они используют методы математической статистики и теории вероятностей. В студенческом лабораторном практикуме не требуется высокой точности, поэтому использование сложных методов расчета ошибок не имеет смысла. Мы будем пользоваться упрощенной схемой расчета ошибок, которая, тем не менее, использует фундамент более сложных методов.

Итак, в силу того, что физическую величину нельзя измерить абсолютно точно, мы должны получить не число, а некоторый ряд чисел, среди которых с большой долей вероятности находится истинное значение определяемой величины. Пусть A — истинное значение измеряемой величины. При измерении были получены значения: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Тогда результат каждого измерения отличается от истинного значения на величину

$$\begin{aligned}\Delta A_1 &= |A - A_1| \\ \Delta A_2 &= |A - A_2| \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta A_n &= |A - A_n|\end{aligned}$$

Суммируя левые и правые части, получим

$$\sum_{i=1}^n \Delta A_i = n \cdot A - \sum_{i=1}^n A_i$$

Введем важное предположение о том, что если ошибки ΔA_i случайны, то суммарная ошибка измерения равна нулю, т.к. в одном эксперименте мы, равновероятно,

можем получить как положительную, так и отрицательную ошибку. Тогда при большом количестве измерений $\langle A \rangle \rightarrow A$, где $\langle A \rangle$ – среднее значение измеряемой величины.

$$\langle A \rangle = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n A_i$$

Так как в студенческом лабораторном практикуме нет достаточно времени для проведения большого числа экспериментов, то будем считать, что $\langle A \rangle = A$ при $1 \leq n \leq 6$. Тогда ошибка при каждом измерении запишется в виде

$$\Delta A_n = |\langle A \rangle - A_n|$$

ΔA_n называется абсолютной ошибкой измерений. Более точно: абсолютной ошибкой измерения называется именованное (т.е. имеющее размерность) число, показывающее максимально возможное отличие истинного значения измеряемой величины от полученного в эксперименте

$$\langle A \rangle - \Delta A_n \leq A \leq \langle A \rangle + \Delta A_n.$$

Интервал, в который попадает истинное значение измеряемой величины, называется доверительным интервалом. Следовательно, при записи результатов измерений мы будем записывать доверительный интервал

Так как в каждом измерении мы допускаем свою ошибку, то необходимо определить, какую ошибку мы запишем как итоговую ошибку всего эксперимента.

В случае небольшого числа измерений будем считать, что ошибка эксперимента — среднее арифметическое ошибок, допущенных при измерениях

$$\langle \Delta A \rangle = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta A_i$$

Тогда итоговый результат запишется в виде

$$A = \langle A \rangle \pm \langle \Delta A \rangle, \text{ или } A = A_{\text{ср}} \pm \Delta A_{\text{ср}}.$$

Если число измерений три или менее трех, то ошибка эксперимента – наибольшая из полученных ошибок измерений.

Пример; $\Delta A_1 = 0,2$, $\Delta A_2 = 0,1$, $\Delta A_3 = 0,3$, тогда ошибка эксперимента:

$$\Delta A = 0,3.$$

Абсолютная ошибка дает сведения только об интервале, в котором лежит значение измеряемой величины, но ничего не говорит о точности измерений.

Пример. При некоторых измерениях мы допускаем ошибку $\Delta A = 1$ см. Если эта ошибка допускается при измерении расстояния от Ставрополя до Невинномысска, то это высокая точность. Если же эта ошибка допускается при измерении размеров коробка спичек, то это низкая точность.

Сведения о точности измерений дает относительная ошибка.

Относительная ошибка – это отношение абсолютной ошибки к значению измеряемой величины (в дальнейшем мы опускаем слово "средний").

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$$

То есть относительная ошибка показывает, какую долю составляет абсолютная ошибка от значения измеряемой величины. Она измеряется или в процентах, или остается величиной безразмерной, если ее не умножать на 100 %.

Относительная ошибка служит также для сравнения точности разноименных измерений.

Пример. Пусть длина стержня составляет $a = 25,2 \pm 0,8$ см, а его масса $m = 315 \pm 4$ г. Что измерено точнее?

Для ответа на этот вопрос найдем относительную ошибку каждого измерения.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a} = \frac{0,8}{25,2} \cdot 100\% = 3\%$$

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{4}{315} \cdot 100\% = 1,3\%$$

Видно, что массу стержня мы измерили точнее. Поэтому при записи результатов эксперимента мы должны указать не только величину абсолютной, но и величину относительной ошибки.

Методика обработки прямого и косвенного измерения

Прямое измерение

1. Делаем серию измерений (5 – 7) измеряемой величины.
2. Находим среднее значение измеряемой величины

$$A_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n A_i$$

3. Находим абсолютную ошибку каждого измерения

$$\Delta A_n = |A_{cp} - A_n|.$$

4. Находим среднюю абсолютную ошибку

$$\Delta A_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta A_i$$

5. Находим относительную ошибку

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{cp}}{A_{cp}} \cdot 100\%$$

6. Записываем ответ в виде

$$A_{cp} \pm \Delta A_{cp} = \dots$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{cp}}{A_{cp}} \cdot 100\% = \dots$$

Во всех случаях записи именованных величин нужно указать их размерность.

Косвенное измерение

При обработке косвенных измерений будем считать, что при небольшом количестве измерений ошибки накапливаются, т.е. ошибка косвенного измерения — сумма ошибок величин, входящих в косвенное измерение.

Производя измерения, надо стремиться к тому, чтобы точность измерений приближалась к точности прибора. При этом выполняется ряд правил, которые мы сейчас докажем.

Пусть имеются величины $(A \pm \Delta A)$ и $(B \pm \Delta B)$, где A, B — измеренные значения этих величин, ΔA и ΔB — абсолютные ошибки, допущенные при измерении этих величин.

Правило 1

Если $C = A + B$ или $C = A - B$, то $\Delta C = \Delta A + \Delta B$.

Доказательство: $C = A + B$ или $C = A - B$,

тогда: $C \pm \Delta C = A \pm \Delta A + B \pm \Delta B$ или $C \pm \Delta C = A \pm \Delta A - B \pm \Delta B$.

Вычитая из второго равенства первое, получим:

$$\pm \Delta C = \pm \Delta A \pm \Delta B.$$

Для небольшого числа измерений считаем, что ошибки накапливаются, следовательно: $\Delta C = \Delta A + \Delta B$.

Правило 2

Если $C = A \cdot B$ или $C = \frac{A}{B}$ то $\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$

Доказательство: Пусть $C = A \cdot B$, тогда

$$C \pm \Delta C = (A \pm \Delta A) \cdot (B \pm \Delta B) = A \cdot B \pm A \cdot \Delta B \pm B \cdot \Delta A \pm \Delta A \cdot \Delta B.$$

Пренебрегаем $(\Delta A \cdot \Delta B)$, тогда:

$$C \pm \Delta C = (A \pm \Delta A) \cdot (B \pm \Delta B) = A \cdot B \pm A \cdot \Delta B \pm B \cdot \Delta A.$$

$$\rightarrow \Delta C = A \cdot \Delta B \pm B \cdot \Delta A$$

$$\rightarrow \frac{\Delta C}{C} = \frac{A \cdot \Delta B \pm B \cdot \Delta A}{A \cdot B} = \frac{\Delta B}{B} \pm \frac{\Delta A}{A} \text{ или } \frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

Если $C = \frac{A}{B}$, то $\Delta C = \Delta \left(- \right) \left(\frac{A}{B} \right)$,

или $\Delta C = A \cdot (B^{-1}) + \Delta A \cdot (B^{-1})$, но $\Delta(B^{-1}) = -B^{-2} \cdot \Delta B$

$$\rightarrow \Delta C = \frac{B \cdot \Delta A + A \cdot \Delta C}{B^2}$$

$$\text{Разделим обе части на } C = \frac{A}{B} \rightarrow \frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}.$$

То есть, в случае косвенного измерения, в котором проводятся действия вычитания и сложения, удобно сначала искать абсолютную ошибку, а затем относительную, если же проводятся действия умножения, деления, а также возведения в степень, то сначала удобно искать относительную ошибку, а затем уже абсолютную.

В общем случае для нахождения относительной ошибки поступают следующим образом

- 1) логарифмируют выражение;
- 2) дифференцируют полученное выражение;
- 3) заменяют "d" на "Δ" и "-" на "+" между ошибками (так как $d(\ln x) = dx/x$ или $\Delta(\ln x_{cp}) = \Delta x / x_{cp}$).

Пример

$$A = \frac{\sqrt{k} \cdot \sqrt{p}}{(a-b)^3}, \text{ ищем } \frac{\Delta A}{A}.$$

$$1) \ln A = \ln k + (1/2) \cdot \ln p - 3 \cdot \ln(a-b);$$

$$2) \frac{dA}{A} = \frac{dk}{k} + \frac{dp}{2 \cdot p} - 3 \frac{d(a-b)}{a-b};$$

$$3) \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta p}{2 \cdot p} + 3 \frac{\Delta a + \Delta b}{a-b}.$$

Как учесть приборную ошибку

Приборная ошибка указывается на приборе или в паспорте к нему. Может быть указана как абсолютная ошибка, даваемая прибором (например, цена деления на линейке 1 мм), так и относительная ошибка. Величина относительной ошибки определяется классом точности прибора.

Различают классы точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности указывается на лицевой панели прибора, При этом возможны два случая.

1. Класс точности дается в виде числа, не заключенного в кружок. В этом случае указывается величина приведенной ошибки, то есть ошибки, выраженной в процентах от верхнего предела измерений или от длины шкалы. Например, если имеется амперметр, рассчитанный на измерение 100А, с классом точности 0,5, это означает, что приборная ошибка $\Delta I_{приб}$ определяется по формуле

$$\Delta I_{приб} = \frac{0,5}{100} \cdot I_{max},$$

Где $I_{max} = 100\text{A}$.

Тогда $\Delta I_{приб} = 0,5\text{A}$, т.е. абсолютная приборная ошибка измерений составляет 0,5А, в любом диапазоне изменений прибора. А относительная ошибка будет наибольшей в начале шкалы прибора, а наименьшей – в конце шкалы.

2. Класс точности дается в виде числа, заключенного в кружок. В этом случае относительная ошибка указывается в процентах от измеряемой величины. Абсолютная ошибка измерения определяется по формуле

$$\Delta I_{приб} = \frac{k}{100} \cdot I,$$

Где k – класс точности;

I – измеряемое значение тока.

Пусть амперметром с классом точности 0,5 измерили величину тока и получили $I = 20\text{A}$. Тогда приборная ошибка будет

$$\Delta I_{приб} = \frac{0,5}{100} \cdot 20 = 0,1 \text{ A}, \varepsilon = 0,5\%.$$

В случае измерений, проводимых несколькими приборами, приборная ошибка эксперимента – сумма ошибок, даваемых каждым прибором в отдельности. Очевидно, что экспериментальная ошибка не может быть меньше приборной ошибки, поэтому всегда из двух возможных ошибок записываем большую – как более реальную.

Как правильно произвести вычисления и записать ответ

Конечным итогом любого эксперимента является получение некоторого численного значения какой-либо величины: неправильность итоговой записи результата может дать неверные сведения о точности измерения и о значении самой измеряемой величины. Поэтому условимся, что при косвенных измерениях количество значащих цифр в конечном результате может быть лишь на 1 больше, чем среднее арифметическое количества значащих цифр всех величин, входящих в данное измерение, (напомним, что значащие цифры – все цифры, кроме "0", стоящего в начале числа).

Пример: $\frac{100}{3} = 33,3;$

100 – три значащих цифры;

3 – одна значащая цифра;

$$N_{ср} = (3 + 1) / 2 = 2;$$

33,3 – три значащие цифры $\rightarrow 3 > 2$ на единицу.

При записи ошибки измерения необходимо руководствоваться двумя правилами.

Первое правило: при записи ошибки измерения (абсолютной или относительной) условимся, что если первая значащая цифра в ошибке "1" или "2", то можем оставить две значащие цифры, если же "3" или выше – одну значащую цифру.

Пример: 2,5 – верно 2,51 – неверно

0,3 – верно 0,32 – неверно

7 – верно 7,0 – неверно

Второе правило: при записи ошибки разряд, до которого определена ошибка, должен совпадать с разрядом, до которого определена измеряемая величина, или абсолютная ошибка должна заканчиваться в том же разряде, что и результат.

Пример: $27,5 \pm 0,12$ –

неверно;

$27,5 \pm 0,1$ – верно.

Применение этих двух правил необходимо выполнять в той последовательности, в которой они даны в изложении.

Приведем ряд примеров. Пусть были произведены измерения, определены их ошибки, сделаны записи

- 1) $27,12 \pm 0,18$;
- 2) $27,12 \pm 1,8$;
- 3) $27,12 \pm 0,018$;
- 4) $27,12 \pm 3,1$;
- 5) $27,12 \pm 0,31$;
- 6) $27,12 \pm 0,031$;
- 7) $27,12 \pm 3$.

Применяя эти два правила, проверим правильность записи ответов, и если они верны – оставим их без изменений, а если неверны – запишем их правильно

- 1) оба правила выполнены.
- 2) правило 1 выполнено, 2 – нет $\rightarrow$ правильный ответ: $27,1 \pm 1,8$;
- 3) 1 – выполнено, 2 – нет $\rightarrow 27,12 \pm 0,02$;
- 4) 1 – не выполнено, 2 – не выполнено $\rightarrow 27 \pm 3$;
- 5) 1 – не выполнено $\rightarrow 27,12 \pm 0,3$, теперь 2 – не выполнено $\rightarrow 27,1 \pm 0,3$;
- 6) 1 – не выполнено, 2 – не выполнено, поэтому верно $27,12 \pm 0,03$;
- 7) 1 – выполнено, 2 – нет $\rightarrow 27 \pm 3$.

Пользуясь вышеуказанными правилами, мы можем грамотно оформить работу, причем результаты этой работы будут понятны любому, кого они интересуют.

Окончанием работы должен служить ответ, записанный в виде:

$$X \pm \Delta X = \dots$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% = \dots$$

ТЕМА 1. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ.

Лабораторная работа 1. Равноускоренное движение

Цель работы: Измерение зависимости мгновенной скорости от пройденного расстояния.

Формируемые компетенции или их части:

Теоретическая часть

На движущуюся тележку действует сила тяжести, сила реакции опоры, сила трения качения, и сила сопротивления воздуха. В случае малых скоростей, когда силой сопротивления воздуха можно пренебречь, это движение является равноускоренным без начальной скорости. Следовательно, его можно описать законом:

$$S = \frac{at^2}{2} \quad (1.1)$$

где S – путь, a – ускорение, t – время.

Для проверки этого закона можно использовать следующий метод. Так как движение тележки равноускоренное, то при любых S , при прочих равных условиях, ускорение будет неизменным, т.е.

$$\frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2} = \dots = \text{const} \quad (1.2)$$

Если это так, значит закон справедлив. Таким образом, задача эксперимента состоит в измерении t для соответствующих S и проверки условия 1.2.

Однако ряд причин случайного характера (например, неточность начального расположения тележки, инерционность при пуске, застойные явления в подшипниках оси блока и т.п.) усложняют эту зависимость.

Введем параметр τ – случайную величину, характеризующую неопределенность моментов начала и конца движения. Тогда,

$$S(t, \tau) = \frac{a(t + \tau)^2}{2} \quad (1.3)$$

Преобразовав это выражение, получим:

$$S(t, \tau) = \frac{a\tau^2}{2} + a\tau t + \frac{at^2}{2} \quad (1.4)$$

Если распределение случайной величины τ симметрично относительно значения $\bar{\tau}$ (то есть положительные и отрицательные значения τ равновероятны), то $\bar{\tau} = 0$, $\bar{\tau}^2 \neq 0$, следовательно, введя обозначения $B \equiv \frac{a}{2}$ и $S_0 \equiv \frac{a\bar{\tau}^2}{2}$, можно записать:

$$S(t) = S_0 + Bt^2 \quad (1.5)$$

Этот закон содержит два параметра: S_0 – начальное смещение и B – величину, равную половине ускорения. Эти параметры определяются по измеренным значениям пройденного пути S_i и сериям значений промежутков времени $t_{i,j}$ методом наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов

Пусть в результате эксперимента мы получили ряд измерений величины y : $y_1, y_2, \dots, y_n$ соответствующих значениям аргумента $t_1, t_2, \dots, t_n$, которые могут быть представлены на графике в виде точек (рисунок 1.1). Нам необходимо установить эмпирическую зависимость между y и t .

Очевидно, если соединить последовательно эти точки, то получим ломаную линию, не имеющую ничего общего с искомой зависимостью $y = f(t)$. Это следует хотя бы из того, что форма этой ломаной линии не будет воспроизводиться при повторных сериях измерений.

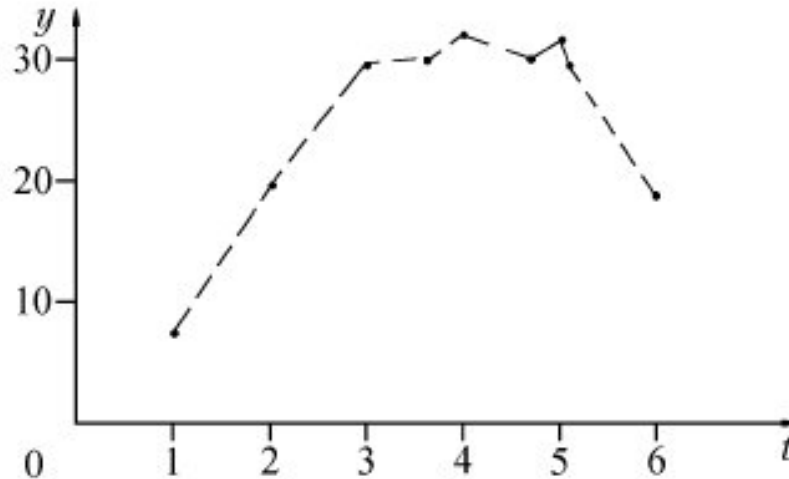


Рисунок 1.1

Измеренные значения y_i будут в общем случае смещены относительно искомой кривой как в сторону больших, так и в сторону меньших значений, вследствие статистического разброса (рисунок 1.2).

Задача состоит в том, чтобы по данным экспериментальным точкам найти гладкую кривую (или прямую), которая проходила бы как можно ближе к графику “истинной” функциональной зависимости $y = f(t)$.

Теория вероятностей показывает, что наилучшим приближением будет такая кривая (или прямая) линия, для которой сумма квадратов расстояний по вертикали от экспериментальных точек до этой кривой будет минимальной.

Этот метод нахождения эмпирической зависимости получил название *метода наименьших квадратов*. Сущность этого метода состоит в следующем.

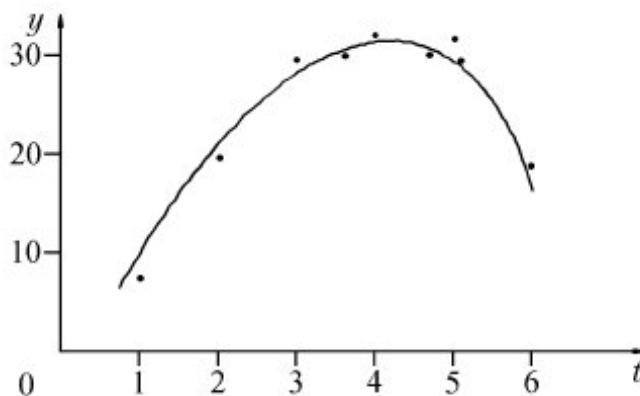


Рисунок 1.2

Предположим, что искомая зависимость выражается функцией $y = f(t, A_1, A_2, \dots, A_m)$, где $A_1, A_2, \dots, A_m$ — параметры. Значения этих параметров

определяются так, чтобы точки y_i располагались по обе стороны этой кривой, как можно ближе к последней, то есть, чтобы сумма квадратов отклонений измеренных значений y_i от функции $y = f(t)$ была наименьшей. (Это соответствует предположению, что разброс точек относительно кривой $y = f(t)$ подчиняется закону нормального распределения.)

Мерой этого разброса является дисперсия σ^2 или ее приближенное выражение $(\Delta S_n)^2$ – средний квадрат отклонений:

$$(\Delta S_n)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - y(t_i)]^2 \quad (1.6)$$

Этот средний квадрат отклонений и должен принять минимальное значение. Как известно, функция $f(A)$ принимает минимальное значение при $A = A_{min}$, если ее первая производная равна нулю, а вторая производная положительна при значении $A = A_{min}$. Для функции многих переменных эти условия заменяются требованием, чтобы частные производные, то есть производные по параметру A_i удовлетворяли вышеупомянутым условиям (при этом остальные параметры $A_k (k \neq i)$ при вычислении производных считаются постоянными).

Таким образом, из условий минимума мы получаем систему уравнений для определения наилучших значений параметров. Рассмотрим применение метода наименьших квадратов на примере отыскания эмпирической зависимости пути, проходимого тележкой по направляющей, от времени.

Полагая, что “истинная” зависимость пути от времени имеет вид

$$S(t) - S_0 = Bt^2 \quad (1.7)$$

можно рассмотреть случайные отклонения:

$$(\Delta \bar{S})_i = S_i - S(t_i) \quad (1.8)$$

где S_i – измеренные положения тележки в моменты времени t_i .

Запишем квадратичную форму

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2)^2 \quad (1.9)$$

и потребуем, чтобы эта квадратичная форма, описывающая сумму квадратов отклонений точек S_i от искомой кривой, была минимальной:

$$F(S_0, B) = \min \quad (1.10)$$

Тогда из равенства нулю частных производных от F по параметрам S_0 и B получим два уравнения

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial S_0} = -2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial B} = -2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2) \cdot t_i^2 = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

Эти уравнения можно переписать в виде

$$nS_0 + B \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^2 = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1.12)$$

$$S_0 \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^2 + B \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^4 = \sum_{i=1}^n S_i \bar{t}_i^2 \quad (1.13)$$

Решение этой системы позволяет найти значения S_0 и $B = \frac{a}{2}$, а затем определить ускорение a .

(В уравнениях 1.11 – 1.14 индекс i соответствует усредненному значению данного параметра соответствующей серии измерений в таблицах 1.1 и 1.2)

Оборудование и материалы

1. Лабораторная установка «Равноускоренное движение»
2. Цифровой секундомер
3. Набор гирь

Описание экспериментальной установки

Схема учебно–лабораторного оборудования «Равноускоренное движение» представлена на рисунке 1.3.

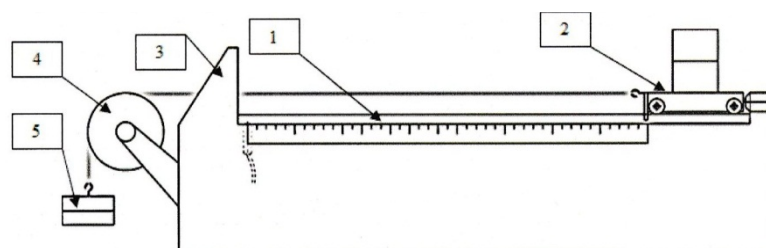


Рисунок 1.3 – Конструкция изделия

Оборудование конструктивно представляет собой, горизонтально расположенную направляющую (1), по которой, в прямолинейном направлении, может катиться тележка (2). С одной стороны дорожка оснащена упором (3) для остановки тележки и вращающимся блоком (4). Через блок перекинута легкая капроновая нить, одним концом соединенная с тележкой, а другим, со свободно подвешенным цилиндрическим грузом (5). В исходном положении тележку удерживает электромагнит, отпускающий тележку по запуску секундомера. При освобождении тележки, груз приходит в движение, придавая ей поступательное, равноускоренное движение. На самой тележке так же предусмотрена возможность установки грузов для изменения ее массы и следовательно характера ускорения при проведении опытов.

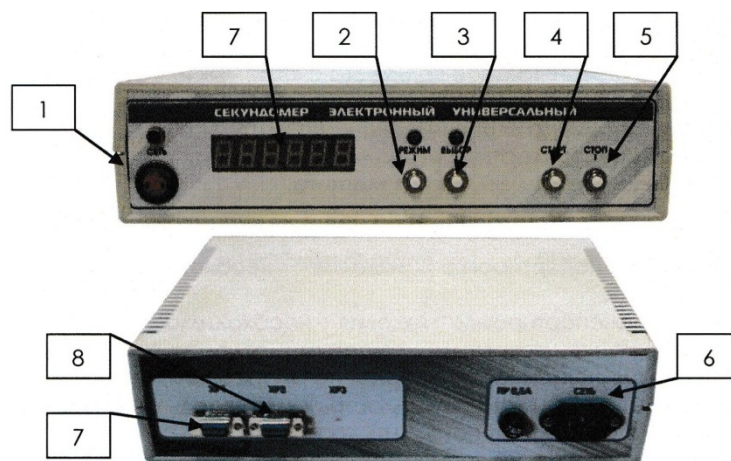


Рисунок 1.4 – Панель управления цифрового секундомера

Оборудование «Цифровой секундомер» предназначено для измерения интервалов времени и позволяет определять значения до тысячных секунд. Вреязадающим устройством секундомера является кварцевый генератор. Сигнал стабилизированной частоты с кварцевого генератора поступает на вход микроконтроллера, обеспечивающего следующие функции: приём командных сигналов от кнопочных переключателей и внешних датчиков; обработку сигналов в программе, в соответствии с установленным режимом работы, и выдачу результатов обработки на устройства цифровой индикации и светодиоды. Требуемый режим работы задаётся нажатием соответствующей кнопки выбора режима. После нажатия кнопки (1), происходит включение прибора и загорается электронный дисплей (7) на котором отображаются значения измерений при работе.

Кнопка «РЕЖИМ», позволяет выбрать нужный режим, для получения нужных временных значений.

Кнопка «ВЫБОР» подтверждает выбранный ранее режим.

Кнопка «СТОП», нажатием кнопки «СТОП» осуществляется включение магнита (если он используется в установках, где есть магнит)

Кнопка «СТАРТ», при нажатии кнопки происходит счет импульсов, после формирования 6-ти импульсов, счет импульсов останавливается.

Режим "Г" данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Секундомер работает в пяти режимах:

Режим "1" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Максимальное количество импульсов: 6. Нажимая кнопку «ВЫБОР» можно просмотреть время до каждого из импульсов.

Режим "2" – данный режим позволяет определить интервал между данным и последующим импульсом. При нажатии кнопки «ВЫБОР» можно просмотреть время между интересующими нас импульсами. Максимальное количество считаемых импульсов: 6.

Режим "3" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до 1-го сформированного импульса.

Режим "4" – стандартный режим секундомера.

Режим "5" – режим включения магнита.

Указания по технике безопасности

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.

- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.
- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.
- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.
- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.
- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.
- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.
- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.
- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)
- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

Задания

1. Замерьте расстояния вдоль направляющей между вертикальной металлической шпилькой тележки, установленной в начальное положение и датчиками Д1; Д2; Д3; Д4; Д5; Д6.
2. Полученными значениями в таблице 1.1 заполните графы – Пройденное расстояние S_i .
3. Установите на тележку груз массой 1000 грамм.
4. Закрепите на свободный конец капроновой нити груз массой 50 грамм.
5. Включите электронный секундомер, убедитесь, что секундомер работает в 1–м режиме (цифра на крайнем правом индикаторе), если нет – нажимая кнопку «Режим» выберите 1 режим работы.
6. Придерживая правой рукой груз, закрепленный на нити, переместите тележку по направляющей в крайнее левое положение до упора и нажмите кнопку «Стоп» для включения электромагнита.
7. Нажмите кнопку «Старт», электромагнит выключится, после чего грузик и тележка начнут двигаться, одновременно запустится секундомер, а на табло мелькать цифры – отсчет времени.
8. После прохождения тележкой всего пути до упора в конце направляющей – секундомер остановит отсчет автоматически.
9. В таблицу 1.1 для значения пути $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ занесите значение промежутка времени $t_{1,i}$ в секундах. После останова секундомера на табло будет отображаться значение времени для S_1 , последовательно нажимая кнопку «Выбор», запишите значения для $S_2 - S_6$.
10. Затем проведите измерения еще четыре раза, повторяя пункты 6 – 9 и вписывая в таблицу 1.1 значения $t_{2,i}, t_{1,3}, t_{4,i}, t_{6,i}$.

Таблица 1.1

№ п/п	Пройденное расстояние S_i, m	ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ						Среднее значение $\bar{t}_i, c$
		$t_{1,i}, c$	$t_{2,i}, c$	$t_{3,i}, c$	$t_{4,i}, c$	$t_{5,i}, c$	$t_{6,i}, c$	
1								
2								
3								
4								
5								

11. После выполнения измерений выключить секундомер.

Обработка результатов измерений

В каждой серии измерений промежутков времени найдите среднее значение $\bar{t}_i$ с двумя цифрами после запятой. Данные запишите в таблицу 1.1.

Для нахождения параметров S_0 и B методом наименьших квадратов следует внести в таблицу 1.2 следующие данные, предварительно рассчитав недостающие:

$$S_i, \bar{t}_i, \bar{t}_i^2, \bar{t}_i^4, S_i \bar{t}_i$$

(Здесь i – номер серии измерения)

Подсчитайте суммы по всем сериям измерений указанных данных (i изменяется от 1 до 5): $\sum_{i=1}^5 S_i, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^4$ и $\sum_{i=1}^5 S_i \bar{t}_i^2$ и так же внести в таблицу 1.2.

Решите систему уравнений 1.14 относительно параметров S_0 и B используя числа, взятые из последней строчки таблицы:

$$\begin{cases} 5S_0 + B \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2 = \sum_{i=1}^5 S_i \\ S_0 \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2 + B \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^4 = \sum_{i=1}^5 S_i \bar{t}_i^2 \end{cases} \quad (1.14)$$

Таблица 1.2

i	S_i	$\bar{t}_i$	$\bar{t}_i^2$	$\bar{t}_i^4$	$S_i \bar{t}_i^2$
1					
2					
3					
4					
5					
$\sum_{i=1}^5$					

Определите значения S_0 и B , необходимо на миллиметровой бумаге построить график зависимости пути от времени ($S(t) = S_0 + Bt^2$ в виде сплошной линии. Затем на этом же графике отметить значения $\bar{t}_i$ и S_i в виде отдельных точек.

Рассчитайте погрешность измерений по общим правилам

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.

4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

Контрольные вопросы

1. Какие величины характеризуют прямолинейное движение?
2. Какое движение называется равномерным, ускоренным?
3. В чем состоит принцип метода наименьших квадратов?
4. Начертите график зависимости пути от времени для равноускоренного движения без начальной скорости, с начальной скоростью; график пути для равнозамедленного движения.
5. Объясните смысл и происхождение слагаемого S_0 и величины B в законе пути, полученном в результате работы.
6. С какой целью применяется метод наименьших квадратов?

Тема 2. Механика.

Лабораторная работа 2. Вращательное движение с равномерным ускорением

Цель и содержание работы:

Целью работы является изучение законов вращательного движения тела при равномерном угловом ускорении.

Содержание работы состоит в определении и зависимости углового ускорения от массы тела и массы ускоряющего груза.

Формируемые компетенции или их части:

ОПК-2 – способностью применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач

Теоретическая часть

В настоящей работе определяется зависимость углового перемещения от времени для равноускоренного движения при помощи учебного стенда «Вращательное движение с равномерным ускорением», схема которого представлена на рисунке 2.3. Движение шкива можно принять равноускоренным, если считать, что момент силы трения постоянен ($M_{тр} = \text{const}$) и что нить нерастяжима и не проскальзывает по шкиву. Используя известную формулу для координаты тела при равноускоренном движении с нулевой начальной скоростью:

$$x = a \frac{t^2}{2} \quad (2.1)$$

с учетом соотношения $a = \varepsilon \frac{D}{2}$ – получаем формулу для косвенного измерения углового ускорения при полном обороте:

$$\varepsilon = \frac{2 \times 2\pi}{t^2} \quad (2.2)$$

Зависимость углового ускорения шкива от массы m ускоряющего груза

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно фиксированной оси вращения в приближении невесомой нити имеет вид:

$$I_e = M_{\text{рез}} = T \frac{D}{2} - M_{\text{тр}} \quad (2.3)$$

Уравнение выписано в проекции на ось вращения; I – момент инерции шкива относительно неподвижной оси; ε – проекция углового ускорения шкива на ось вращения; $M_{\text{рез}}$ – проекция результирующего момента всех сил на ось вращения, складывающаяся из момента силы натяжения нити T и момента силы трения $M_{\text{тр}}$ тормозящего вращение шкива.

Силу натяжения нити T можно определить из второго закона Ньютона для массы m , его проекция на направление движения груза m имеет вид:

$$ma = mg - T \quad (2.4)$$

где a – ускорение движения массы m .

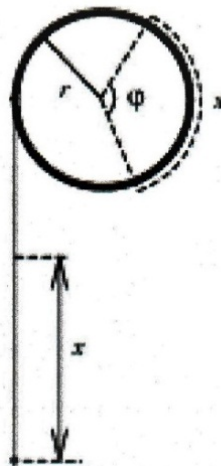


Рисунок 2.1 – Схема блока с натянутой капроновой нитью

В приближении нерастяжимой нити по рисунку 2.1 получаем соотношения, связывающие поступательное движение массы m с вращением шкива.

$$\frac{x}{r} = \varphi, V = \frac{dx}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} r = \omega r; a = \frac{ds}{dt} = \frac{d\omega}{dt} r = \varepsilon r = \varepsilon \frac{D}{2} \quad (2.5)$$

Здесь φ (рад) – угол поворота шкива радиусом r при опускании груза на расстояние x ; V и φ – соответствующие линейная и угловая скорости; D – диаметр шкива.

С учетом уравнений 2.4 и 2.5 из уравнения 2.3 находим угловое ускорение шкива:

$$\varepsilon = \frac{mg \frac{D}{2} - M_{\text{тр}}}{I + m \frac{D^2}{4}} \quad (2.6)$$

Очевидно, что при $M_{\text{тр}} = \text{const}$ (момент сил трения постоянен) вращение шкива является равноускоренным.

Из полученной формулы видно, что маятник будет вращаться с $\varepsilon > 0$ лишь при выполнении условия:

$$m > m_0 = \frac{2M_{\text{тр}}}{gD} \quad (2.7)$$

т. е. при массе груза m , достаточной для того чтобы был преодолен момент сил трения, препятствующий вращению шкива.

Формула 2.6 упрощается при выполнении неравенства

$$I \gg m \frac{D^2}{4} \quad (2.8)$$

зависимость углового ускорения ε от массы опускающегося груза при этом становится линейной:

$$\varepsilon = \frac{mgD}{2I} - \frac{M_{\text{тр}}}{I} \quad (2.9)$$

График зависимости $\varepsilon(m)$ при выполнении неравенства 2.8 приведён сплошной линией на рисунке 2.2. Штриховой линией показана точная зависимость 2.6. Штриховая горизонтальная прямая – асимптота при $m \rightarrow \infty$.

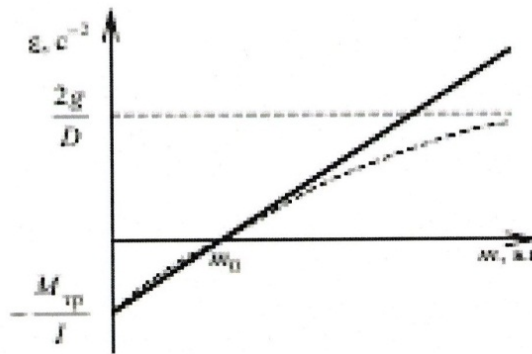


Рисунок 2.2 – График зависимости величин

Примечание. Если момент сил трения зависит от времени, то вращение маятника не будет равноускоренным. Возможен случай, когда момент сил трения пропорционален угловой скорости:

$$M_{\text{тр}} = M_0 + A\omega \quad (2.10)$$

где A – коэффициент пропорциональности;

$M_0 = m_0 g \frac{D}{2}$ – момент сил трения покоя при $\omega = 0$. Заметим, что при $m < m_0 = \frac{M_0}{Dg}$ (сравните с формулой 2.7) вращение шкива не происходит. Решая дифференциальное уравнение 2.6 с учетом выражения 2.10, можно показать, что угловое ускорение ε в момент времени t дается формулой:

$$\varepsilon = \frac{(m - m_0)gD}{2(I + m \frac{D^2}{4})} \cdot e^{-\frac{A}{I + m \frac{D^2}{4}} \cdot t} \quad (2.11)$$

Оценка стандартного отклонения s производится по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n}} \quad (2.12)$$

Оборудование и материалы

1. Установка «Крутильный маятник Поля»
2. Цифровой секундомер

Описание экспериментальной установки

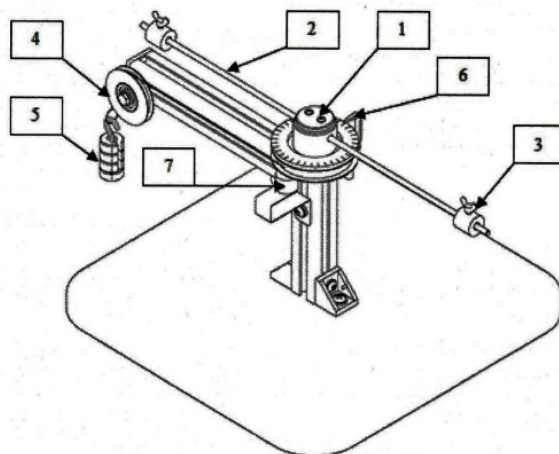


Рисунок 2.3 – Конструкция изделия:

1 – металлический шкив; 2 – стержень; 3 – регулируемые грузы; 4 – блок; 5 – цилиндрические грузы; 6 – датчик; 7 – электромагнит.

Схема лабораторной установки показана на рисунке 2.3. и конструктивно представляет собой, металлический шкив (1), горизонтально закрепленный на вертикальной опоре при помощи подшипников вращения. К верхней плоскости шкива присоединен металлический маховик, меньшего диаметра, на котором радиально закреплены два симметричных стержня (2). На каждом из стержней расположен груз (3) при этом имеется возможность регулировки расстояния установки груза относительно центра вращения маховика. К вертикальной опоре, ниже шкива, горизонтально прикреплен металлическая рейка, на конце которой в вертикальной плоскости установлен блок (4), который свободно вращается в собственных подшипниках. Через блок перекинута тонкая капроновая нить. Нить намотана на основной шкив и закреплена на нем, а свободным концом привязана к подвесному цилиндрическому грузу (5). Металлический шкив (1) может быть удержан от вращения при помощи металлического флажка и электромагнита (7). Если не удерживать шкив, то под действием опускающегося груза, нить разматывается и приводит шкив в ускоренное вращение. Время периода вращения шкива измеряется электронным секундомером. Для этого на стенде установлен индукционный датчик (6), который фиксирует каждый оборот шкива в определенной точке и передает сигнал в секундомер. Длина нити подобрана так, что при полной ее размотке, шкив успевает сделать шесть полных оборотов вокруг оси вращения. Следовательно, при проведении опыта секундомер будет фиксировать шесть периодов вращения.

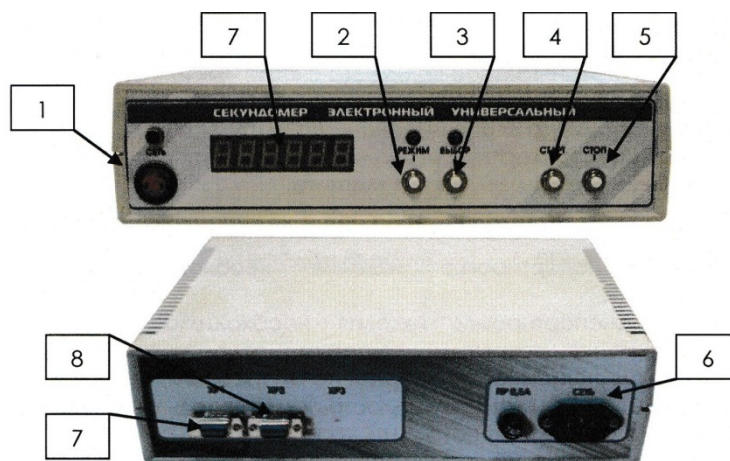


Рисунок 2.4 – Панель управления цифрового секундомера: 1 – кнопка включения прибора; 2 – кнопка «РЕЖИМ»; 3 – кнопка «ВЫБОР»; 4 – кнопка «СТАРТ»; 5 – кнопка

«СТОП»; 6 – разъем для сетевого кабеля; 7 – дисплей(на первом рисунке) разъем XI (на втором рисунке, магнит); 8 – разъем X2(датчик)

Оборудование «Цифровой секундомер» предназначено для измерения интервалов времени и позволяет определять значения до тысячных секунд. Временязадающим устройством секундомера является кварцевый генератор. Сигнал стабилизированной частоты с кварцевого генератора поступает на вход микроконтроллера, обеспечивающего следующие функции: приём командных сигналов от кнопочных переключателей и внешних датчиков; обработку сигналов в программе, в соответствии с установленным режимом работы, и выдачу результатов обработки на устройства цифровой индикации и светодиоды. Требуемый режим работы задаётся нажатием соответствующей кнопки выбора режима. После нажатия кнопки(1), происходит включение прибора и загорается электронный дисплей (7) на котором отображаются значения измерений при работе.

Кнопка «РЕЖИМ», позволяет выбрать нужный режим, для получения нужных временных значений.

Кнопка «ВЫБОР» подтверждает выбранный ранее режим.

Кнопка «СТОП», нажатием кнопки «СТОП» осуществляется включение магнита (если он используется в установках, где есть магнит)

Кнопка «СТАРТ», при нажатии кнопки происходит счет импульсов, после формирования 6-ти импульсов, счет импульсов останавливается.

Режим "Г" данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Секундомер работает в пяти режимах:

Режим "1" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Максимальное количество импульсов: 6. Нажимая кнопку «ВЫБОР» можно просмотреть время до каждого из импульсов.

Режим "2" – данный режим позволяет определить интервал между данным и последующим импульсом. При нажатии кнопки «ВЫБОР» можно просмотреть время между интересующими нас импульсами. Максимальное количество считаемых импульсов: 6.

Режим "3" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до 1-го сформированного импульса.

Режим "4" – стандартный режим секундомера.

Режим "5" – режим включения магнита.

Указания по технике безопасности

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.
- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.
- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.

- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.
- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.
- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.
- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.
- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.
- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)
- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

Задания

1. Закрепить на свободном конце капроновой нити груз массой m .
2. Установите грузы на штангах шкива с расстоянием R от центра вращения. Расстояния R задаются преподавателем.
3. Включить электронный секундомер, убедиться, что секундомер работает в 1-ом режиме (цифра на крайнем правом индикаторе), если нет – нажимая кнопку «Режим» выбрать 1 режим работы.
4. Придерживая правой рукой груз, закрепленный на нити, намотать оставшуюся ее часть на шкив.
5. Вращая шкив рукой, установить металлический флажок прямо над электромагнитом.
6. Нажать кнопку «Стоп» на секундомере, убедившись, что шкив удерживается от проворачивания (следить, чтобы флажок не смещался относительно электромагнита), после этого нажать кнопку «Старт» на секундомере, электромагнит выключится.
7. Подвешенный груз начнет движение вниз, маховик начнет вращаться, а на табло начнется отсчет времени.
8. После прохождения грузиком всего пути – секундомер остановится автоматически.
9. После останова секундомера на табло будет отображаться значение времени периода вращения 1-го полуоборота T , последовательно нажимая кнопку «Выбор», записать значения для $T_2 - T_6$.
10. Затем провести измерения еще два раза, повторяя пункты 3 – 9. Записать значения.
11. Заменить груз подвеса на другой, массой $m = xxx$. И провести опыт для этого груза повторяя пункты 3 – 10.
12. Вычислите значения ε для всех значений m и R предыдущих пунктов.
13. Вычислите оценки стандартных отклонений s для всех значений ε при обоих грузах m .
14. Постройте зависимость ε от m при двух значениях m на одном и том же графике с учетом оценок стандартных отклонений. По полученным графикам сделайте оценки момента сил трения и момента инерции.
15. Проверьте, используя оценку момента инерции I в пункте 14, выполнение неравенства $I \gg m \frac{D^2}{4}$, при котором справедлива линейная зависимость углового ускорения от массы m ускоряющего груза, для различных значений массы m из проведенных опытов.
16. Рассчитайте ошибку измерений по общим правилам

Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы? Какие величины в работе измеряются непосредственно?
2. Как направлены векторы угловой скорости $\vec{\omega}$, углового ускорения $\vec{\varepsilon}$, результирующего момента сил и момента сил трения в случае ускоренного вращения?
3. Как вы записываете уравнение динамики вращательного движения маятника в данной работе?
4. Какова модель нити? Как свойства идеальной нити влияют на вид кинематических и динамических уравнений?
5. Покажите на рисунке все силы, действующие на шкив. Почему в уравнении динамики вращательного движения 1.3 не учтены моменты некоторых из этих сил?
6. Перечислите все допущения, при которых получается линейная зависимость углового ускорения ε от массы m .
7. Выведите зависимость углового ускорения ε от массы m опускающегося груза t в приближении линейной зависимости $\varepsilon(m)$.
8. Как в данной работе рассчитать оценку стандартного отклонения величины ε ?
9. Подтверждается ли измерениями линейная теоретическая зависимость углового ускорения ε от массы ускоряющего груза m ?

Тема 3. Колебания и волны.

Лабораторная работа 3. Исследование законов механических колебаний с помощью крутильного маятника поля

Цель работы: изучить понятие о резонансной частоте, колебаниях, вращательном движении, свободных и вынужденных колебаниях.

Формируемые компетенции или их части:

ОПК-2 – способностью применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач

Теоретическая часть

Рассмотрим движение твердого тела произвольной формы и размеров относительно связанной с ним закрепленной точки О (рисунок 3.1). Точку крепления тела назовем точкой подвеса. Такое закрепленное в точке подвеса твердое тело представляет собой физический маятник. Опыт показывает, что физический маятник, будучи выведенным из положения равновесия, совершает колебательное движение.

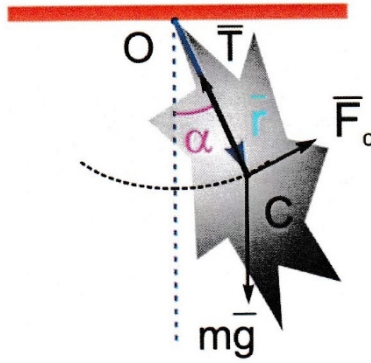


Рисунок 3.1 – Физический маятник и действующие на него силы.

Согласно основному закону динамики вращательного движения произведение момента инерции физического маятника на его угловое ускорение равно равнодействующему моменту внешних сил: силы тяжести $\vec{m}\vec{g}$, силы сопротивления $\vec{F}_c$ и силы упругой деформации $\vec{T}$ твердого тела. Момент силы $\vec{T}$ равен нулю, поскольку деформация растяжения тела в любой момент времени параллельна радиус-вектору $\vec{r}$, определяющему положение центра масс тела относительно точки подвеса. Следовательно,

$$I\ddot{a} = \overline{M} + \overline{M}_c \quad (3.1)$$

где $a(t)$ – угол отклонения маятника, отсчитываемый от положения равновесия;

$\overline{M}$ – момент силы тяжести, стремящийся возратить систему в положение равновесия; $\overline{M}_c$ – момент силы сопротивления.

Будем считать, что для случая малых колебаний момент силы тяжести, пропорционален углу отклонения маятника от положения равновесия, а момент силы сопротивления – скорости его движения, т. е.

$$M = -mgr \sin(a) = -k \sin(a)$$

где M – проекция момента силы тяжести на ось вращения (для малых колебаний $M = -ka$); $M_c = -h\dot{a}$ – проекция момента сил сопротивления на ось вращения (выражение справедливо для малых скоростей).

Тогда, спроецировав уравнение 3.1 на направление оси вращения, получим:

$$I\ddot{a} = M + M_c = -ka - h\dot{a} \quad (3.2)$$

где k и h – размерные константы; I – момент инерции маятника.

Поделив левую и правую части уравнения 3.2 на I и перенеся все слагаемые в левую часть, получим дифференциальное уравнение, описывающее динамику собственных затухающих колебаний физического маятника.

$$\ddot{a} + 2\beta\dot{a} + \omega_0^2 a = 0 \quad (3.3)$$

где $\beta = h/2I$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = (\frac{k}{I})^{1/2}$ – собственная частота колебаний маятника.

Решение уравнения 3.3 для случая малого сопротивления $\omega_0 > \beta$ имеет вид:

$$a(t) = a_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.4)$$

где ω – частота свободных затухающих колебаний маятника.

Как видно из уравнения (3.4) амплитуда углового смещения a_m будет уменьшаться (затухать) с течением времени по экспоненциальному закону:

$$a_m(t) = a_0 e^{-\beta t} \quad (3.5)$$

Коэффициент затухания определяет быстроту этого процесса. Он равен промежутку времени, по истечении которого амплитуда колебаний уменьшается в $e = 2.73$ раз.

Колебания при наличии затухания не являются гармоническими и даже периодическими. Условно, за период слабо затухающих колебаний можно принять минимальный промежуток времени между двумя ближайшими локальными максимумами или минимумами функции $a(t)$ – углового смещения маятника относительно положения равновесия (рисунок 3.2).

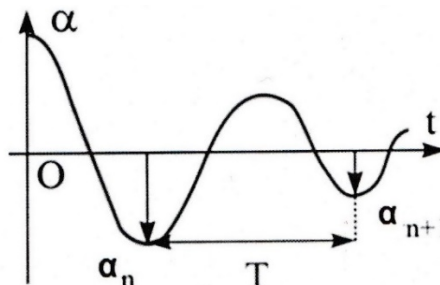


Рисунок 3.2 – Затухающие колебания при малом сопротивлении

Для характеристики интенсивности затухания используют понятие логарифмического декремента затухания. Пусть, T – условный период затухающих колебаний a и a – амплитудные значения отклонения a маятника от положения равновесия для двух его соседних максимумов или минимумов (рисунок 3.2). Величина d , равная

$$d = \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) \quad (3.6)$$

Называется логарифмическим декрементом затухания.

Можно показать, что $d = \beta T$, а величина $1/d$ равна числу колебаний, по истечении которых их амплитуда уменьшается в e раз.

В случае большого трения, когда $\omega_0 = \beta$ решение уравнения 3.3 имеет вид

$$a(t) = (a_0(1 + \beta t) + \dot{a}(0)t) e^{-\beta t} \quad (3.7)$$

где a и $a(0)$ – начальное угловое смещение и начальная угловая скорость соответственно.

Примерный вид зависимостей $a(t)$ при разных начальных условиях для случая $\omega_0 = \beta$ приведен на рисунке 3.3а. Особенностью таких колебаний, называемых критическими, является то, что описывающая их зависимость $a(t)$ пересекает ось времени не более одного раза.

При очень сильном трении, когда $\beta > \omega_0$ решение уравнения 3.3 представляет собой сумму двух убывающих с течением времени экспонент. При этом система колебаний как таковых не совершает (рисунок 3.3 б). В целом, кинетика процесса затухания похожа на зависимость 2, приведенную на рисунке 3.3 а, однако, поскольку трение больше, чем в критическом режиме, то возврат к положению равновесия происходит медленнее другими словами, будучи выведенной из положения равновесия, система без осцилляций очень медленно возвращается в равновесное состояние. Такой режим колебаний называется аperiодическим или закритическим.

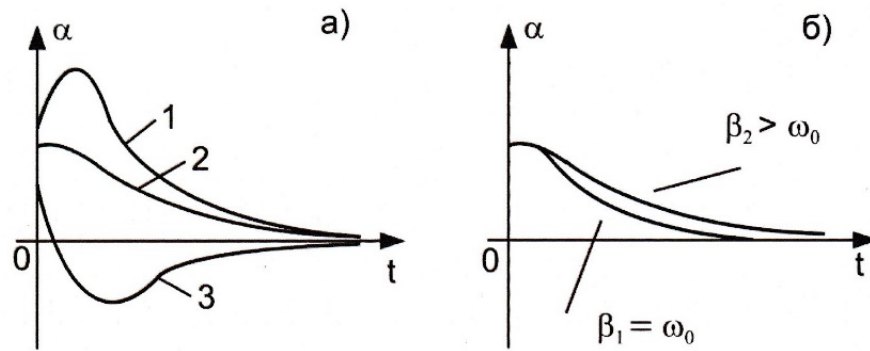


Рисунок 3.3 – Вид критических и ангармонических колебаний

а) критические колебания при различных начальных условиях

б) критические и аperiodические колебания при одинаковом начальном условии

$$\dot{\varphi}(0) = 0$$

Для возбуждения в системе незатухающих колебаний, необходимо за счет внешних сил скомпенсировать потери энергии, обусловленные наличием сопротивления среды. Колебания, которые совершает система под действием внешней периодической силы, называются вынужденными.

Характер движения системы при этом зависит от особенностей внешней силы. Наиболее важным является случай гармонической внешней силы, а в случае крутильных колебаний – гармонического момента сил. Пусть на физический маятник, кроме возвращающего момента и момента сил сопротивления действует момент внешней силы, изменяющийся по гармоническому закону:

$$M = M_0 \cos(\omega t) \quad (3.8)$$

где M_0 – амплитуда момента внешней силы; ω – частота изменения момента внешней силы.

Согласно основному закону динамики вращательного движения имеем:

$$I\ddot{\alpha} = -k\alpha - h\dot{\alpha} + M_0 \cos(\omega t) \quad (3.9)$$

Общее решение уравнения (2.9) можно представить в виде:

$$\alpha(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos \left[\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \cdot t + \varphi \right] + a_m \cdot \cos(\omega t + \psi) \quad (3.10)$$

где A и φ – постоянные величины, определяемые из начальных условий, т. е. начальных значений углового смещения и угловой скорости физического маятника; a , ψ – постоянные величины (параметры вынужденных колебаний), которые определяются свойствами системы и внешним воздействием.

Первое слагаемое в выражении 3.10 описывает собственные затухающие колебания системы, а второе – гармонические колебания с амплитудой a , совершающиеся с частотой вынуждающей силы. Наложение этих колебаний создает результирующее движение, имеющее характер «биений». Биения проявляются в том, что колебания совершаются с изменяющейся амплитудой.

Графики биений имеют вид, представленный на рисунке 3.4.

Поскольку первое слагаемое в уравнении 3.10 экспоненциально затухает с течением времени, то через определенный временной интервал, называемый временем установления колебаний, собственные колебания системы прекратятся. Колебания, которые устанавливаются в системе после затухания амплитуды собственных колебаний, называются установившимися вынужденными колебаниями.

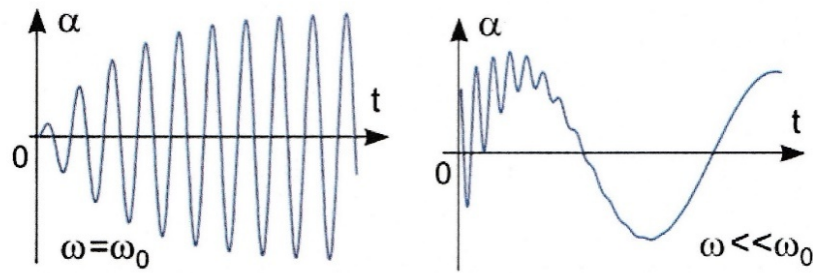


Рисунок 3.4 – Графики вынужденных колебаний для случаев $\omega = \omega_0$ и $\omega \ll \omega_0$

Установившиеся вынужденные колебания описываются уравнением:

$$a(t) = a_m \cos(\omega t + \psi) \quad (3.11)$$

где a – амплитуда установившихся вынужденных колебаний; ψ – сдвиг фаз между угловым смещением физического маятника и вынуждающей силой.

Из уравнения 3.8 и 3.11 следует, что движение физического маятника в установившемся режиме представляют собой гармонические колебания с частотой, равной частоте вынуждающей силы. Параметры вынужденных колебаний определяются, исходя из следующих уравнений:

$$a_m = \frac{M_0}{(I \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2})} \quad (3.12)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{-2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (3.13)$$

Амплитуда a_m и фаза вынужденных колебаний существенно зависят от отношения между частотой ω изменения внешнего момента сил $\overline{M}$ и собственной частотой ω_0 колебаний системы. На рисунке 3.5 изображены зависимости амплитуды углового смещения от частоты вынуждающей силы, соответствующие разным значениям коэффициентов затухания β . Из рисунка 3.5 видно, что при определенном значении частоты вынуждающей силы ω амплитуда вынужденных колебаний достигает своего максимального значения, равного α_m . Такое явление называется резонансом, а частота, при которой оно происходит – резонансной частотой. Зависимость $a_m = f(\omega)$ называется амплитудной резонансной кривой или амплитудно–частотной характеристикой маятника.

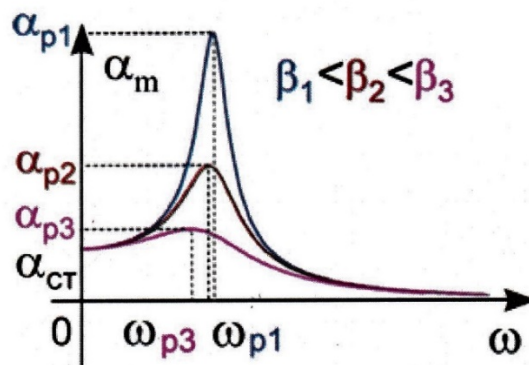


Рисунок 3.5 – Амплитудно–частотная характеристика

a_m – амплитуда, a_p – резонансная амплитуда

Приравняв производную выражения 3.12 к нулю $\frac{da_m}{d\omega} = 0$, получим, что при малом сопротивлении среды амплитуда углового смещения a в резонансе равна

$$a_p = M_0 / (2I\beta_0) \quad (3.15)$$

Из уравнения 3.12 следует, что

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (3.14)$$

т.е. ω_p зависит от свойств среды, в которой совершаются колебания.

Если $\omega = 0$, то амплитуда вынужденных колебаний оказывается равной величине статистического углового смещения a системы под действием постоянного момента внешней силы. При частоте ω , стремящейся к бесконечности, все амплитудные кривые асимптотически приближаются к нулю, так как в данном случае система не успевает отреагировать на действие вынуждающего момента внешних сил и остается в состоянии равновесия.

Как следует из уравнения (3.13), сдвиг по фазе между силой и угловым смещением зависит от соотношения частот собственной и вынуждающей силы, а также от коэффициента затухания (рисунок 3.6). При $\omega = \omega_0$ смещение отстает от силы на $\pi/2$. Это означает, что в момент времени, когда момент внешней силы достигает своего максимального значения, угловое смещение равно нулю.

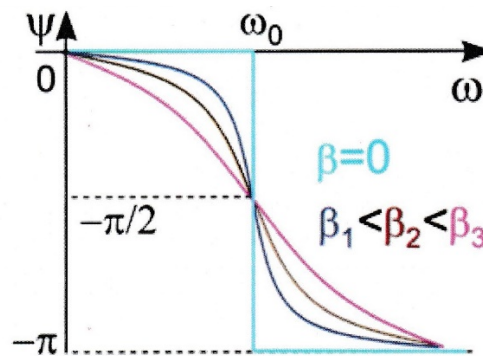


Рисунок 3.6 – Фазовые резонансные кривые маятника

С увеличением частоты изменения момента внешней силы отставание углового смещения от величины момента силы растет и при очень больших частотах ω приближается к $-\pi$, т. е. момент силы и угловое смещение колеблются в противофазе.

Фазовые соотношения между угловым смещением и моментом внешней силы позволяют понять сущность явления резонанса с точки зрения энергетических соображений. Покажем, что при $\omega = \omega_0$ угловое смещение отстает по фазе от вынуждающего момента гармонической силы на $\pi/2$, т. е.

$$M = M_0 \cos(\omega_0 t); a = a_m \sin(\omega_0 t) \quad (3.16)$$

Согласно выражению 2.16 зависимость угловой скорости физического маятника от времени имеет вид:

$$\dot{a} = a_m \omega_0 \cos(\omega_0 t) \quad (3.17)$$

Из соотношений 3.16 и 3.17 видно, что скорость и внешняя сила колеблются в фазе. Следовательно, мощность, развиваемая внешней силой, положительна в любой момент времени, а энергия, передаваемая системе от внешнего источника максимальна (угловая скорость маятника при частоте вынуждающей силы, равной собственной частоте

колебаний, максимальна). Работа внешнего момента сил в случае $\omega = \omega_0$ направлена на преодоление сил трения.

Оборудование и материалы

1. Стенд «Крутильный маятник Поля»

Описание установки

Симметричное тело (тонкий металлический диск) (2) скрепляется со спиральной пружиной (3). Диск отводится от положения равновесия, сжимая или растягивая пружину, после чего диск начинает совершать колебательное движение с периодом, зависящим от величины момента инерции диска и коэффициента затухания.

Вынужденные гармонические колебания диска создаются в системе путем соединения стрелки, на которую насажена пружина со скрепленным с ней диском, с двигателем (4) через штангу с валом, частоту оборотов которого можно изменить. (рисунок 3.7).

Коэффициент затухания в системе изменяется путем пропускания постоянного электрического тока через катушки индуктивности, в зазоре между которыми перемещается маятник (металлический диск). При движении диска в магнитном поле в нем индуцируются токи Фуко, что в итоге приводит к появлению дополнительного тормозящего момента сил.

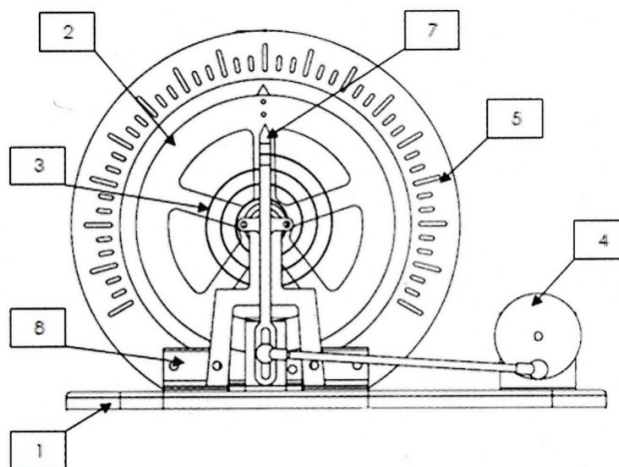


Рисунок 3.7 – Общий вид экспериментальной установки

1 – основание; 2 – колесо Поля; 3 – возвратная пружина; 4 – электродвигатель; 5 – линейка; 7 – стрелка; 8 – магниты

Указания по технике безопасности

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.
- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.

- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.
- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.
- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.
- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.
- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.
- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.
- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.
- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)
- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

Задания

Упражнение 1

1. Соберите электрическую схему.
2. Не подключая источник питания к маятнику Поля, отклоните его на 10–20 делений (относительных единиц) шкалы транспортира, расположенного на установке, а затем отпустите диск маятника. Измерьте три раза период свободных колебаний маятника, а затем рассчитайте циклическую частоту затухающих колебаний.
3. Экспериментальным путем установите зависимость амплитуды углового смещения маятника от времени в режиме свободных колебаний. Для этого измеряйте угловую амплитуду через промежутки времени, кратные периоду колебаний. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

	a_1	a_2	a_3	a_{cp}	a_0	,с	$\frac{a_{cp}}{a_0}$	$\ln \frac{a_{cp}}{a_0}$	$t \ln \frac{a_{cp}}{a_0}$	t^2
Т										
Т										
Т										
Т										

4. Постройте график зависимости $a_{cp} = f(t)$.
5. Используя МНК, рассчитайте коэффициент затухания маятника Поля для случая минимального коэффициента сопротивления в системе (ток через катушку индуктивности не пропускается) по формуле:

$$\beta = \frac{\sum_i t_i \ln \frac{a_{cpi}}{a_0}}{\sum_i t_i^2}$$

6. Рассчитайте собственную частоту колебаний маятника по формуле: $\omega_0 = (\omega^2 + \beta^2)^{1/2}$

7. Подключите катушки к источнику питания, пропустив через катушки индуктивности постоянный ток, соответствующий напряжениям на источнике питания 4 В, 6 В и 10 В, и повторите пункты 1–5.

Упражнение 2

1. Соберите схему. Напряжение на катушки индуктивности пока не подавайте, тем самым обеспечивая самый малый коэффициент сопротивления в системе. На выходе DC (постоянный ток) источника питания установите напряжение 15 В.

2. Регулируя положение ручек грубой и плавной настройки потенциометров, установите минимальное напряжение на электродвигателе.

3. Выдержите паузу длительностью приблизительно в одну минуту и определите значение периода в режиме установившихся колебаний.

4. Измерьте амплитуду углового смещения, соответствующую данной частоте установившихся колебаний. Амплитуду измеряйте по шкале транспортира в относительных единицах.

5. Повторите пункты 3–4 увеличивая напряжение на электродвигателе. Особенно часто (через 0.05 – 0.1 В) проводите измерения в области резкого изменения амплитуды углового смещения.

6. Постройте амплитудно–резонансную кривую.

7. Повторите пункты 2 – 6 данного упражнения при напряжениях, подаваемых на катушки индуктивности, равных 4 В, 6 В и 10 В, устанавливая тем самым различные коэффициенты затухания.

8. Исходя из амплитудно–резонансных кривых определите резонансную частоту ω и значения амплитуды a_p вынужденных колебаний при резонансе статической амплитуды $a_{ст}$. Рассчитайте собственную частоту колебаний согласно формуле 2.14 и сравните ее со значением, полученным в упражнении 1.

9. Рассчитайте добротность системы по формуле $Q = \frac{a_p}{a_{ст}}$

10. Используя формулу 3.13, рассчитайте сдвиг фаз ψ между угловым смещением маятника и вынуждающей силой для каждого значения частоты ω .

11. Постройте фазовые резонансные кривые для различных коэффициентов затухания в системе.

12. Рассчитайте ошибку измерений по общим правилам

Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются свободными?
2. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний. проанализируйте его решение.
3. В чем заключается физический смысл коэффициента затухания?
4. Чем определяется собственная частота системы и частота затухающих колебаний?
5. Что такое критический и ангармонический режимы колебаний? Каковы их отличительные особенности?
6. Какие колебания называются вынужденными?
7. Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний. Проанализируйте его решение.
8. Что такое переходной и установившийся режим вынужденных колебаний?
9. От чего зависит время установления колебаний?
10. От чего зависят амплитуда и частота установившихся вынужденных колебаний?
11. В чем заключается явление резонанса?
12. Что такое резонансная частота? От каких физических величин она зависит?
13. Чему равно статическое смещение маятника?
14. Дайте определение добротности системы. Как она связана с резонансной амплитудой и статическим смещением?
15. Что представляют собой установившиеся вынужденные колебания, происходящие под действием внешней гармонической силы?
16. Объясните, чему равен сдвиг фаз между смещением и вынужденной силой при резонансе.

ТЕМА 4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Лабораторная работа 4. Увеличение внутренней энергии за счет механической работы

Цель работы:

1. Исследование зависимости температуры алюминиевого тела от работы сил трения.
2. Определение удельной теплоемкости алюминия.

Формируемые компетенции или их части:

ОПК-2 – способностью применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач

Теоретическая часть

Внутренняя энергия системы (в данном случае алюминиевого тела) – это энергия хаотического (теплого) движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов) и энергия взаимодействия этих частиц. Внутренняя энергия – однозначная функция термодинамического состояния системы, т.е. в каждом состоянии система обладает вполне определенным значением внутренней энергии. Изменить внутреннюю энергию системы (тела) ΔU можно при теплообмене, сообщая системе количество теплоты Q или совершая работу A' над системой, т.е. можно говорить о двух формах передачи энергии от

одних тел к другим: в форме работы и в форме теплоты. Другими словами энергия механического движения может превращаться в энергию теплового движения атомов и молекул и наоборот. При этих превращениях должен выполняться закон сохранения и превращения энергии. Первое начало термодинамики и является законом сохранения энергии применительно к термодинамическим процессам. Первое начало термодинамики – результат обобщения многовековых опытных данных. Многочисленные опыты показывают, что в соответствии с законом сохранения энергии при любом способе перехода системы из состояния с энергией U_1 в состояние с энергией U_2 изменение внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1$ будет одинаковым и равным разности между количеством теплоты Q , полученным системой, и работой A , совершенной системой против внешних сил:

$$\Delta U = Q - A \quad (6.1)$$

или

$$Q = \Delta U + A \quad (6.2)$$

Уравнение 6.2 представляет собой математическое выражение первого начала термодинамики: теплота, сообщаемая системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. Выражение 6.2 для малого изменения состояния системы будет иметь следующий вид:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A \quad (6.3)$$

где ΔU – бесконечно малое изменение внутренней энергии системы. В этом выражении ΔU является полным дифференциалом. ΔQ – бесконечно малое количество теплоты, ΔA – бесконечно малая работа. ΔQ и ΔA не являются полными дифференциалами, поскольку работа и количество теплоты не являются функциями состояния.

В данной лабораторной работе увеличение внутренней энергии алюминиевого тела происходит только за счет внешней механической работы ($Q = 0$). Работа, совершаемая внешней силой A' над системой, будет численно равна работе, совершаемой системой, но взятой с противоположным знаком, т.е. $A' = -A$. Тогда уравнение 6.1 принимает следующий вид:

$$\Delta U = A \quad (6.4)$$

Оборудование и материалы

1. Установка «Увеличение внутренней энергии за счёт механической работы»
2. Цифровой мультиметр
3. Набор грузов

Описание экспериментальной установки

Схема лабораторной установки «Увеличение внутренней энергии за счёт механической работы» показана на рисунке 6.1.

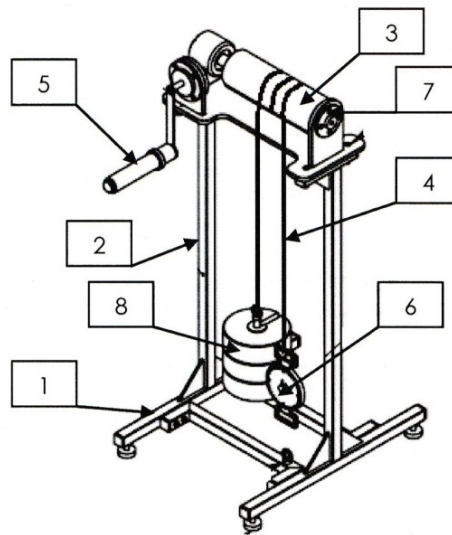


Рисунок 6.1 – Конструкция изделия

К основанию (1) прикреплена рама (2), на верхней балке которой расположена ось с закрепленным исследуемым алюминиевым цилиндрическим телом (3), внутрь которого встроен температурный датчик (7) (термопара), с помощью которого можно измерить температуру исследуемого тела. Бечёвка (4) намотана на цилиндрическое тело. Вращение оси происходит с помощью рукоятки (5). При вращении оси возникает трение бечевки (4), в результате чего происходит нагрев алюминиевого цилиндра. На концах бечевки закреплены грузы (8) для уравнивания силы трения. Измерение возникающей силы возможно за счет установленного динамометра (6). Показания с температурного датчика отображаются на дисплее мультиметра.

Видно, что один конец нити привязан к динамометру, который показывает натяжение нити T_2 . На втором конце нити висит груз массой 2–10 кг, который создает постоянное натяжение нити T_1 (см. рисунок 6.2).

Очевидно, что результирующая этих сил $F = T_2 - T_1$ уравнивается силой трения, поэтому работа, совершаемая для преодоления силы трения за N оборотов алюминиевого цилиндра, составляет

$$A = F \cdot \pi \cdot d \cdot k \cdot N \quad (6.5)$$

где $d = 37$ мм (диаметр цилиндрического тела), k – число витков бечевки, N – число оборотов алюминиевого тела. Работа сил трения переходит во внутреннюю энергию тела, т.е. повышается температура алюминиевого цилиндра с начального значения t_0 до конечного значения t_n . Это соответствует увеличению внутренней энергии на величину

$$\Delta U = m \cdot c_{Al} \cdot (t_n - t_0) \quad (6.6)$$

где m – масса тела, c_{Al} – удельная теплоемкость алюминия.

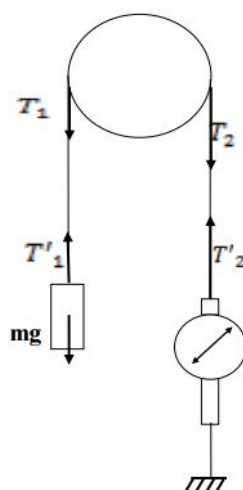


Рисунок 6.2 – Схема установки

На основании закона сохранения энергии можно записать:

$$m \cdot c_{Al} \cdot (t_n - t_0) = F \cdot \pi \cdot d \cdot k \cdot N \quad (6.7)$$

или

$$m \cdot c_{Al} \cdot (t_n - t_0) = A \quad (6.8)$$

Преобразовав выражение 1.8, получим:

$$t_n = t_0 + \frac{1}{m \cdot c_{Al}} \cdot A \quad (6.9)$$

Наличие пропорциональности между изменением температуры системы Δt и совершенной работой является доказательством справедливости первого закона термодинамики. По наклону этой прямой (рисунок 6.3) можно определить также удельную теплоемкость алюминия.

Из формулы 6.9 видно, что

$$c_{Al} = \frac{1}{m} \cdot \frac{A}{\Delta t} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{\tan \alpha} \quad (6.10)$$

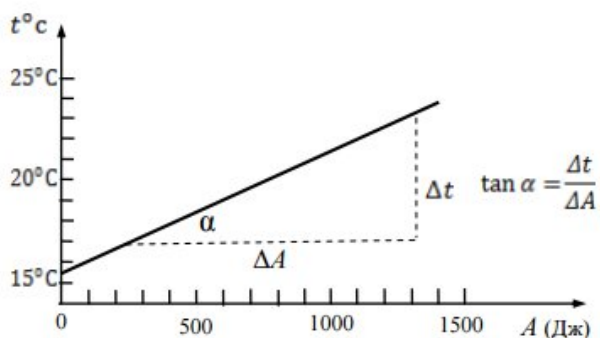


Рисунок 6.3 – График зависимости температуры от совершенной работы

Указания по технике безопасности

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.
- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.
- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.
- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.
- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.
- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.
- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.
- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.
- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)
- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

Задания

Определение коэффициента трения покоя

1. Медленно поворачивая рукоятку, добейтесь проскальзывания бечевки, а потом, плавно вращая рукоятку, сделайте 10 оборотов.
2. Во время вращения рукоятки запишите показание динамометра. Надо учесть, что динамометр проградуирован в кГс (килограмм– сила). $1\text{ кГс} \sim 10\text{ Н}$.
3. Подождите примерно 1 минуту, пока температура выровняется и показания прибора перестанут изменяться. Запишите эти показания, а затем сделайте еще 10 оборотов, подождите 1 минуту и запишите второе значение. Продолжайте опыт, пока не получите 6–7 значений сопротивления датчика.
4. Результаты измерений занесите в таблице 6.1.

Таблица 6.1

№	Число оборотов шкива N	Показание динамометра T_2	Показание датчика (кОм)	Температура $t\text{ }^{\circ}\text{C}$	Работа А

5. Переведите значения сопротивления в температуру.
6. По формуле 6.5 рассчитайте совершаемую работу.
7. Постройте график зависимости температуры t от совершаемой работы A (смотрите рисунок 6.3).
8. Найдите по графику $tg\alpha$.
9. Зная массу цилиндра и тангенс угла наклона прямой, по формуле 6.10 определите удельную теплоемкость алюминия, где $m = 450$ г (масса алюминиевого цилиндра).

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренняя энергия тела?
2. От чего зависит внутренняя энергия тела?
3. Как можно изменить внутреннюю энергию тела?
4. В чем отличие внутренней энергии тела U от Q и A ?
5. Как формулируется первый закон термодинамики?
6. Как определяется работа внешних сил в этом опыте?
7. Как осуществляется проверка первого закона термодинамики в этом опыте?
8. Как определяется удельная теплоемкость алюминия?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература:

1. Трофимова, Т. И. Физика: учебник: для студентов вузов, обучающихся по техн. напр. подготовки / Т.И. Трофимова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Академия, 2013. - 346 с.: ил. - (Высшее профессиональное образование) (Бакалавриат). - Предм. указ.: с. 330-339. - ISBN 978-5-7695-9820
2. Трофимова, Т. И.; Курс физики с примерами решения задач: В 2-х т.: учебник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов, Т.2. - М. : Кнорус, 2015. - 378 с. - (Бакалавриат). - Прил.: с. 376-378. - ISBN 978-5-406-04428-5.

Дополнительная литература:

1. Повзнер, А. А. Физика. Базовый курс. Часть 1 [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. А. Повзнер, А. Г. Андреева, К. А. Шумихина. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 168 с. — 978-5-7996-1701-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/68406.html>
2. Никеров, В. А. Физика. Современный курс [Электронный ресурс]: учебник / В. А. Никеров. — Электрон. текстовые данные. — М.: Дашков и К, 2016. — 454 с. — 978-5-394-02349-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14114.html>
3. Чертов, А. Г. Задачник по физике : [учеб. пособие для вузов] / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. - 8-е изд., перераб. и доп. - М. :Физматлит, 2007. - 640 с. : ил. - Прил.: с. 623-640. - ISBN 5-94052-098-7

Методическая литература:

1. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика»: Часть 1. Механика. Молекулярная физика. – Невинномысск, НТИ СКФУ, 2019. - 80 с.
2. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Физика». – Невинномысск, НТИ СКФУ, 2019. - 141 с.

Интернет – ресурсы:

1. <http://www.iprbookshop.ru> – Электронно-библиотечная система IPRbooks;
2. <http://window.edu.ru> – Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам;
3. <http://catalog.ncfu.ru> – электронные каталоги Ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО;
4. <https://openedu.ru> – Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование».

Лабораторная работа 5. Исследование идеальных газов

Цель работы: произвести количественный анализ реального газа и определить его точки фазового перехода.

Формируемые компетенции или их части:

Теоретическая часть

Закон идеальных газов

Одним из основных процессов идеального газа является изотермический процесс. Изотермическим процессом называется процесс, протекающий при постоянной температуре T .

Поведение газа, при изотермическом процессе подчиняется закону Бойля – Мариотта: при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, произведение объёма газа на его давление остаётся постоянным.

$$PV = \text{const} \quad (7.1)$$

График изотермического процесса на PV -диаграмме называется изотермой. Полезно знать графики изотермического процесса на VT – и PT – диаграммах (рисунок 7.1)

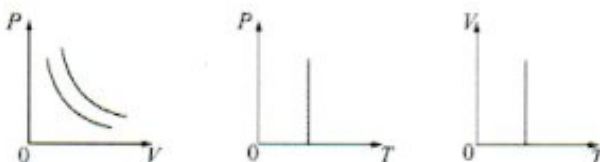


Рисунок 7.1 – Графики изотермического процесса.

Реальный газ – газ, свойства которого зависят от взаимодействия частиц и их собственного объема, что особенно проявляется при высоких давлениях и низких температурах.

Зависимости между его параметрами показывают, что молекулы в реальном газе взаимодействуют между собой и занимают определенный объем. Состояние реального газа часто на практике описывается обобщенным уравнением Клапейрона–Менделеева:

$$pV = Z_r(p,T) \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (7.2)$$

где p – давление; V – объем; T – температура; $Z_r = Z_r(p,T)$ – коэффициент сжимаемости газа; m – масса; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная.

Отличие реальных газов от идеальных

Реальные газы отличаются от своей модели – идеальных газов – тем, что их молекулы имеют конечные размеры и между ними действуют силы притяжения (при значительных расстояниях между молекулами) и отталкивания (при сближении молекул друг с другом). Характер изменения этих сил взаимодействия в зависимости от расстояния между центрами молекул r показан на рисунке 7.2. На рисунке 7.3 в P – v диаграмме представлена изотерма реального вещества 1–2–3–4 и изотерма идеального газа.

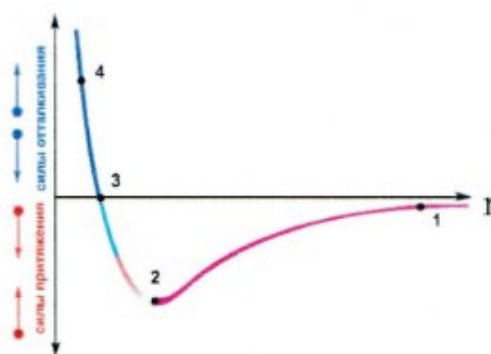


Рисунок 7.2 – Зависимость изменения сил взаимодействия между молекулами от расстояния между их центрами

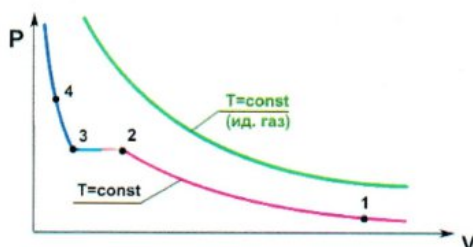


Рисунок 7.3 – Изотермы реального вещества и идеального газа в P , V –диаграмме критические параметры газов

Характер поведения изотермы реального вещества 1–2–3–4 (рисунок 7.3) можно частично объяснить характером изменения сил взаимодействия между молекулами (рисунок 7.2) в зависимости от расстояния между их центрами при изменении давления, считая, что на обоих рисунках линиям 1–2–3–4 соответствует одна и та же изотерма.

В точке 1 при малых давлениях расстояние между молекулами большое (очень), здесь действуют небольшие силы взаимного притяжения молекул. На участке 1–2 при увеличении давления газ сжимается, объем его уменьшается. По мере увеличения давления и уменьшения объема молекулы сближаются, силы притяжения возрастают и достигают максимума в точке 2. Силы взаимного притяжения молекул обуславливают появление внутреннего давления, которое возрастает по мере сближения молекул и приводит к более интенсивному изменению объема газа. Действие сил притяжения молекул в точке 2 аналогично действию пружины, которая полностью растянута.

Далее, начиная с точки 2 и до 3 (рисунок 7.3) газ будет переходить в жидкую фазу, т.е. здесь одновременно существуют газовая и жидкая фазы при одинаковых давлениях и температурах. В отношении двух молекул это динамичный процесс сближения, о двух фазах здесь говорить нельзя (рисунок 7.2), в точке 2 был газ, а в точке 3 стала жидкость. При этом силы взаимного притяжения молекул уменьшаются, и в точке 3, где весь газ вступил в жидкую фазу, силы притяжения уравниваются силами отталкивания (условная пружина находится в свободном состоянии, не сжата и не растянута).

Уменьшение объема на процессе 2–3 (рисунок 7.3) с одной стороны, обусловлено внутренним давлением, которое падает в среднем до нуля в точке 3, а с другой стороны, объясняется образованием жидкой фазы, т.е. по мере увеличения количества капелек жидкости в смеси уменьшается количество газа, для газа объем соответствует точке 2, а для жидкости – точке 3, в результате удельный объем смеси при фазовом переходе уменьшается от точки 2 до 3.

При дальнейшем увеличении давления (процесс 3–4 рисунки 7.2 и 7.3) сжимается только жидкая фаза, при этом расстояния между молекулами настолько малы, что преобладают силы отталкивания, т.к. на сжатие уже оказывает влияние собственный объем молекул, соизмеримый со свободным объемом жидкой фазы. Т.е. собственный объем молекул оказывает противоположное воздействие силам взаимного притяжения (условная пружина полностью сжата). В результате этого воздействия дальнейшее увеличение давления не приводит к значительному уменьшению объема жидкой фазы, т.е. жидкость – плохо сжимаемая фаза вещества.

Фазовые переходы

Переходы вещества из одной фазы в другую при изменении параметров состояния, характеризующих термодинамическое равновесие. Значение температуры, давления или какой-либо другой физической величины, при котором происходят фазовые переходы в однокомпонентной системе, называется точкой перехода.

Критические температура и давление. Газы могут быть превращены в жидкость сжатием при условии, что температура не превышает определенного для каждого газа значения.

Температура, при которой и выше которой данный газ не может быть сжижен никаким повышением давления, называется критический $T_{кр}$.

Давление, при котором и выше которого повышением температуры нельзя испарить жидкость, называется критическим $P_{кр}$.

Объем газа, соответствующий критической температуре, называется критическим $V_{кр}$, а состояние газа, отвечающее критической температуре, критическому давлению и критическому объему – критическим состоянием газа.

При критическом состоянии плотность пара становится равной плотности жидкости.

Точка фазового перехода реального газа характеризуется критической температурой T_c , критическим давлением p_c и критической плотностью ρ_c . Ниже критической температуры вещество находится в газообразном состоянии при больших объемах и в жидком состоянии при маленьких объемах. При промежуточных объемах оно может существовать как смесь жидкости и газа, в которой изменение объема в изотермических условиях вызывает изменение агрегатного состояния: газообразная фракция увеличивается с увеличением объема, а давление смеси остается постоянным. Поскольку жидкость и пары имеют разные плотности, они разделяются в поле тяготения. По мере повышения температуры плотность жидкости уменьшается, а плотность газа возрастает, пока эти две плотности не станут равными одному и тому же значению критической плотности. Выше критической температуры газ невозможно перевести в жидкое состояние. Однако в изотермических условиях газ не подчиняется закону Бойля–Мариотта, пока его температура не поднялась значительно выше критической температуры.

Шестифтористая сера (SF_6) особенно подходит для исследования свойства реальных газов, поскольку ее критическая температура ($T_c = 319 \text{ K}$) и ее критическое давление ($p_c = 37,6 \text{ бара}$) относительно низкие. К тому же она не токсична и совершенно безопасна при использовании в учебном процессе и на практических занятиях.

Устройство для изучения точки фазового перехода состоит из прозрачной измерительной емкости, которая имеет очень толстые стенки и способна выдерживать высокие давления. Внутренний объем емкости можно изменять, крутя штурвал, что позволяет осуществлять тонкую регулировку и снимать показания с точностью до $1/1000$ максимального объема. Давление создается гидравлической системой, в которой используется касторовое масло фармакологического качества. Гидравлическая система отделена от емкости коническим резиновым уплотнением, которое втягивается при изменении объема. Такая конструкция гарантирует, что разницей давлений между измерительной емкостью и масляной частью на практике можно пренебречь. Поэтому вместо непосредственного измерения давления газа манометр измеряет давление масла, что позволяет избежать наличия «мертвого» объема в газовой части системы. Измерительная емкость заключена в прозрачную водяную камеру. В ходе проведения опыта термостатическая водяная ванна поддерживает строго контролируемую и регулируемую постоянную температуру, которая измеряется цифровым термометром.

В ходе наблюдений перехода из газообразного в жидкое состояние и обратного процесса, тот факт, что «мертвый» объем очень мал, позволяет наблюдать образование первой капли жидкости или исчезновение последнего пузырька газа.

Экспериментальный расчет

Зависимость давления от объема измеряется поточно при постоянной температуре, и результаты наносятся на график в виде p – V диаграммы (диаграммы Клапейрона) и pV – p диаграммы (диаграммы Амега). Отклонение от поведения идеального газа сразу же становится явным и очевидным.

По этим диаграммам можно легко определить параметры точки фазового перехода и можно получить четкое экспериментальное подтверждение поведения реального газа.

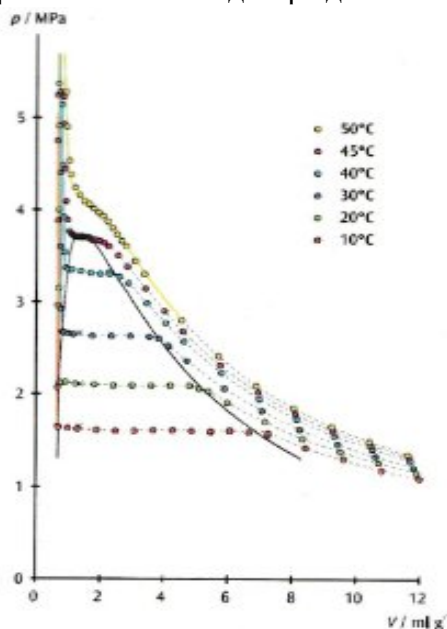


Рисунок 7.4 – p – v диаграмма шестифтористой серы

Оборудование и материалы

1. Навесной термостат
2. Прибор для определения критической температуры
3. Термопара

4. Цифровой быстродействующий карманный термометр
5. Силиконовая трубка

Описание экспериментальной установки

Состав комплекта оборудования «Реальные газы и точка фазового перехода» представлен на рисунке 7.5.

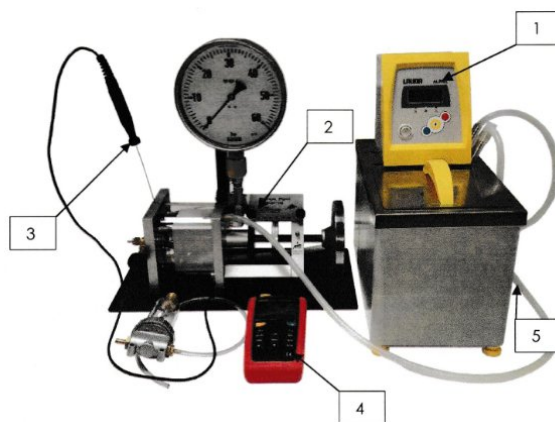


Рисунок 7.5 – Конструкция изделия: 1 – навесной термостат; 2 – прибор для определения критической температуры; 3 – термопара; 4 – цифровой быстродействующий карманный термометр; 5 – силиконовая трубка;

Прибор для определения критической температуры

Прибор для определения критической температуры позволяет исследовать сжимаемость и сжижение газа. Измерения позволяют определить критическую точку газа, а также получить изотермы для адиабатического процесса p – V (диаграммы Клапейрона). Для испытания используется газ шестифтористая сера (SF_6). SF_6 имеет критическую температуру 318,6 К (45,5 °С) и критическое давление 3,76 МПа (37,6 бара), что позволяет собрать простую установку для проведения опытов.

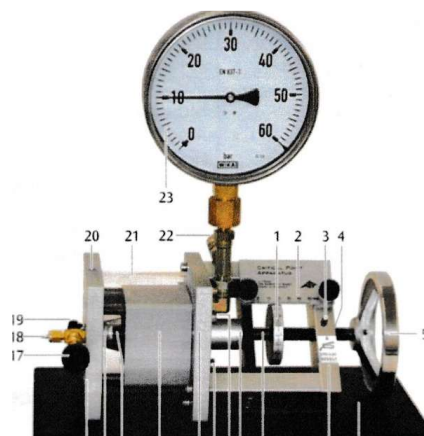


Рисунок 7.6 – Конструкция прибора: 1 – нониусная шкала; 2 – неподвижная шкала; 3 – смазочный ниппель; 4 – резьбовая втулка; 5 – маховичок; 6 – основание; 7 – рама; 8 – резьбовая ось с поршнем; 9 – крышка поршня; 10 – выход теплоносителя; 11 – вход теплоносителя; 12 – концевая пластина; 13 – цилиндр; 14 – коническое уплотнение; 15 – измерительная ячейка; 16 – клапанная пластина; 17 – регулировочный клапан; 18 – арматура 1/8 дюйма по газу; 19 – клапан продувки; 20 – отверстие для термопары; 21 – тепловой корпус; 22 – предохранительный клапан; 23 – манометр (указатель избыточного давления)

Навесной термостат

Навесной термостат Alpha A6 с емкостью с ванной, предназначен для нагрева, перекачивания жидкости и установления температурного режима. Емкость с ванной имеет

максимальный объем ванны 6 литров. Рабочая жидкость для навесного термостата – умягченная вода.

Нагревательный термостат оснащен навесным центробежным насосом, привод которого осуществляется однофазного двигателя с расщепленными полюсами. Объемная подача регулируется с помощью дросселя расхода.

Прибор оснащен четырехразрядным зеленым жидкокристаллическим дисплеем для индикации рабочей температуры и заданных значений, а также рабочих состояний.

Датчик температуры Pt100 определяет температуру на входе в ванну. Аналогово–цифровой преобразователь с высоким разрешением обрабатывает результат измерения. Дальнейшая обработка результата измерения производится с помощью специального алгоритма регулирования.

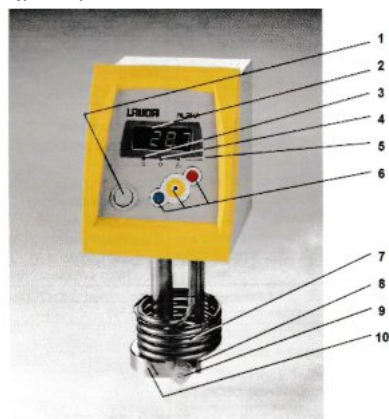


Рисунок 7.7 – навесной термостат Alpha: 1 – сетевой выключатель; 2 – регулятор температуры с четырех разрядным светодиодным указателем; 3 – нагревательное устройство активно (горит желтый светодиод); 4 – устройство охлаждения активно (горит синий светодиод); 5 – сигнал неисправности (мигает красный светодиод); 6 – функции меню, клавиша выбора и ввода; 7 – нагревательный элемент; 8 – датчик температуры Pt100; 9 – отвод насоса с дросселем расхода; 10 – корпус насоса;

Цифровой быстродействующий карманный термометр UNI-TREND модели UT321

Цифровой быстродействующий термометр предназначен для измерения и отображения температуры и используется как температурный датчик К–типа термопар.

Термометр представляет собой микропроцессорное, цифровое устройство.



Рисунок 7.8 – цифровой быстродействующий термометр: 1 – дисплей; 2 – кнопки; 3 – термопара ввода T1; 4 – USB порт; 5 – NTC (компенсация нормальной температуры); 6 – батарейный отсек.

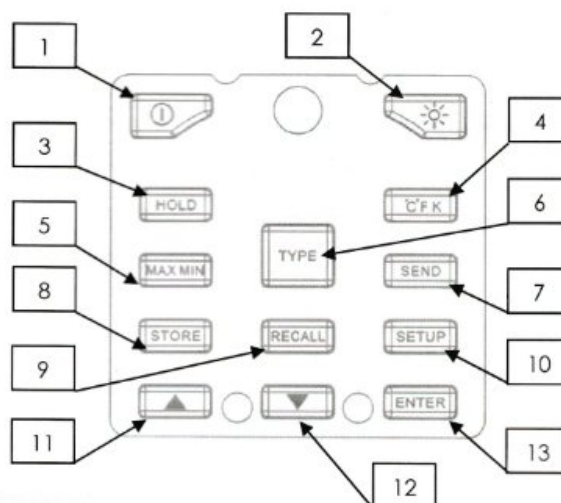


Рисунок 7.9 – описание кнопок на внешней панели прибора: 1 – включение/выключение прибора; 2 – включение/выключение подсветки; 3 – зафиксировать/не фиксировать показания; 4 – переключение единиц температуры в Цельсиях(°C), Фаренгейтах(°F) и Кельвинах (K); 5 – переход к max/min и средним показаниям (нажмите и удерживайте кнопку, чтобы выключить этот дисплей); 6 – переход к K-, J-, T-, E- типам термопары; 7 – для входа в режим USB, значок USB начнет мигать (нажмите еще раз для выхода из USB режима); 8 – запустить/остановить регистрацию; 9 – показать зарегистрированные показания (нажмите еще раз для остановки); 10 – начало или завершение установки (нажмите для прокрутки вариантов установки, которые необходимо изменить); 11 – увеличить отображающиеся настройки; 12 – уменьшить отображающиеся настройки; 13 – подтвердить ранее нажатую кнопку

Порядок измерения температуры

На основании принятого Североамериканского цветового кода ANSI (Американский национальный институт стандартов) каждый тип термопары имеют цветовую маркировку

Тип	Цвет	Тип	Цвет
J	Чёрный	R	Зелёный
K	Жёлтый	S	Зелёный
T	Синий	N	Оранжевый
E	Фиолетовый		

Подключение термопар

1. Подключите термопару во входной разъем (рисунок 7.8, позиция 3);
2. Нажмите кнопку питания для включения термометра (рисунок 7.9, позиция 1);
3. Установите тип термопары, он должен совпадать со штекером в разьеме (рисунок 7.9, позиция 6);

Указания по технике безопасности

При эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- К обслуживанию оборудования допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оборудование находится в выключенном состоянии.

- При обнаружении любых повреждений и неисправностей оборудования, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции, немедленно обесточьте оборудование.

- ЗАПРЕЩАЕТСЯ неисправное оборудование.

- ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать изделие и его отдельные компоненты не по назначению.

- ЗАПРЕЩАЕТСЯ вскрывать изделие.

- ЗАПРЕЩАЕТСЯ видоизменять принципиальную схему и общие функции работы изделия.

- После хранения оборудования в холодном помещении или после перевозки в зимних условиях включать его в сеть можно не раньше, чем через 6 часов пребывания при комнатной температуре в распакованном виде.

- Изделие эксплуатировать только в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.

- Во избежание поражения электрическим током и выхода из строя элементов изделия, при работе запрещается использовать внешние источники питания.

- Не устанавливайте оборудование в непосредственной близости от легковоспламеняющихся и распространяющих огонь предметов.

- Не оставляйте оборудование включенным без присмотра.

- Не допускайте попадания жидкости внутрь оборудования.

- Не оставляйте оборудование в режиме ожидания на длительное время (более 12 часов)

- Во избежание поломок оборудования не прикладывайте чрезмерных усилий при манипуляциях с органами управления.

Задания

С помощью комплекта учебно–лабораторного оборудования «Реальные газы и точка фазового перехода» возможно выполнение следующего лабораторного эксперимента:

1. Выполните количественный анализ реального газа и определите его точки фазового перехода.

2. Произведите наблюдение шестифтористой серы, как в жидком, так и в газообразном состоянии;

3. Постройте изотермы на p – V диаграмме и pV – p диаграмме;

4. Произведите наблюдение отличия поведения реальных газов и газов в идеальном состоянии;

5. Определите точки фазового перехода;

6. Постройте кривые давления для насыщенного пара.

7. Рассчитайте погрешность измерений по общим правилам

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.

2. Цель работы.

3. Описание экспериментальной методики.

4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.

5. Определение погрешности измерения.

6. Выводы.

7. Ответ.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение изотермического процесса
2. В чём заключается отличие реальных газов от идеальных?
3. Что называется точкой фазового перехода?
4. Объясните принцип работы устройства для изучения точки фазового перехода

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература:

1. Трофимова, Т. И. Физика: учебник: для студентов вузов, обучающихся по техн. напр. подготовки / Т.И. Трофимова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Академия, 2013. - 346 с.: ил. - (Высшее профессиональное образование) (Бакалавриат). - Предм. указ.: с. 330-339. - ISBN 978-5-7695-9820
2. Трофимова, Т. И.; Курс физики с примерами решения задач: В 2-х т.: учебник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов, Т.2. - М. : Кнорус, 2015. - 378 с. - (Бакалавриат). - Прил.: с. 376-378. - ISBN 978-5-406-04428-5.

Дополнительная литература:

1. Повзнер, А. А. Физика. Базовый курс. Часть 1 [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. А. Повзнер, А. Г. Андреева, К. А. Шумихина. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 168 с. — 978-5-7996-1701-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/68406.html>
2. Никеров, В. А. Физика. Современный курс [Электронный ресурс]: учебник / В. А. Никеров. — Электрон. текстовые данные. — М.: Дашков и К, 2016. — 454 с. — 978-5-394-02349-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14114.html>
3. Чертов, А. Г. Задачник по физике : [учеб. пособие для втузов] / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. - 8-е изд., перераб. и доп. - М. : Физматлит, 2007. - 640 с. : ил. - Прил.: с. 623-640. - ISBN 5-94052-098-7

Методическая литература:

1. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика»: Часть 1. Механика. Молекулярная физика. – Невинномысск, НТИ СКФУ, 2019. - 80 с.
2. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Физика». – Невинномысск, НТИ СКФУ, 2019. - 141 с.

Интернет – ресурсы:

1. <http://www.iprbookshop.ru> – Электронно-библиотечная система IPRbooks;
2. <http://window.edu.ru> – Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам;
3. <http://catalog.ncfu.ru> – электронные каталоги Ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО;
4. <https://openedu.ru> – Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование».

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ТАБЛИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основные и дополнительные единицы СИ

Величина	Наименование	Обозначение
Основные		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Сила света	кандела	кд
Количество вещества	моль	моль
Дополнительные		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		Русское	Международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гига	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Основные физические константы

Скорость света в вакууме	$c = 299792458 \text{ м/с}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e = 1,601892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,007276470 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,008665012 \text{ а.е.м.}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ Ф/м} \approx 8,84 \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная смещения Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Число «пи»	$\pi = 3,14159 \dots$
Основание натуральных логарифмов	$e = 2,71828 \dots$
Связь десятичного и натурального логарифмов	$\ln a \approx 2,3 \lg a; \quad \lg a \approx 0,43 \ln a$

Плотность вещества, кг/м³ (t = 20 °C)

Алюминий	2700	Керосин	820
Бензин	680-720	Глицерин	1284
Никель	8900	Лед при 0°C	917
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	8400-8700 8520	Масло касторовое	960
Олово	7300	Золото	19300
Вода при 4 °C	1000	Медь	8930
Воздух при нормальных условиях	1,29	Сталь	7700-7900
Дерево сухое: Береза Дуб Тополь	600-800	Ртуть	13546
	700-1000	Свинец	11342
	300-500		
Железо	7870	Спирт этиловый	789

Греческий алфавит

Печатная буква	Название	Печатная буква	Название
Αα	альфа	Νν	ню
Ββ	бета	Ξξ	кси
Γγ	гамма	Οο	омикрон
Δδ	дельта	Ππ	пи
Εε	эпсилон	Ρρ	ро
Ζζ	дзэта	Σσς	сигма
Ηη	эта	Ττ	тау
Θθ	тэта	Υυ	ипсилон
Ιι	йота	Φφ	фи
Κκ	каппа	Χχ	хи
Λλ	ламбда	Ψψ	пси
Μμ	мю	Ωω	омега

Динамическая вязкость некоторых веществ, Па × с

Вода (0 ⁰ С)	0,001787
(20 ⁰ С)	0,001005
(100 ⁰ С)	0,00028
Воздух (0 ⁰ С)	0,0000181
Глицерин (20 ⁰ С)	1,5
Жир рыбий (20 ⁰ С)	0,046
Кровь (20 ⁰ С)	0,005
Масло касторовое (20 ⁰ С)	0,970
Молоко (20 ⁰ С)	0,0018
Спирт этиловый (0 ⁰ С)	0,001773
(20 ⁰ С)	0,0012

Вязкость водного раствора глицерина, Па × с

t, ⁰ С	60 %	80 %	95 %	100 %
20	0,011	0,062	0,545	1,499
25	0,008	0,045	0,366	0,945
30	0,007	0,034	0,248	0,624

Таблица зависимости от температуры вязкости касторового масла

T, К	283	284	285	286	287	288	289	290
η, Па×с	2,44	2,25	2,05	1,85	1,70	1,55	1,42	1,30

T, К	291	292	293	294	295	296	297
η, Па×с	1,18	1,08	0,987	0,91	0,85	0,78	0,72

Модуль Юнга некоторых веществ (p=0,1 мПа, t=20°C)

Вещество	Модуль Юнга X 10 ¹⁰ Па	Вещество	Модуль Юнга X 10 ¹⁰ Па
Алюминий	7,05	Медь	12,98
Олово	5,43	Никель	20,4
Железо	21,2	Свинец	1,62
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	9,7-10,2	Сталь	20,9

*Поверхность натяжения различных жидкостей на границе
«жидкость-воздух» при 20° С, Н/м*

Белок Куриного яйца	0,053	Масло касторовое	0,0364
<i>Бензол</i>	0,03	Молоко	0,042-0,046
Вода при 0° С	0,0756	Раствор мыла	0,04
Вода при 20° С	0,0726	Ртуть	0,05
Бром	0,0442	Скипидар	0,026
Кровь	0,058	Спирт этиловый	0,022

*Максимальная упругость водяного пара
при различных температурах*

°С	Е, мм. рт. ст.	°С	Е, мм. рт. ст.	°С	Е, мм. рт. ст.
0	4,6	13	11,2	26	25,2
1	4,9	14	12,0	27	26,7
2	5,3	15	12,8	28	28,4
3	5,7	16	13,6	29	30,0
4	6,1	17	14,5	30	31,8
5	6,5	18	15,5	31	33,7
6	7,0	19	16,5	32	35,7
7	7,5	20	17,5	33	37,7
8	8,0	21	18,6	34	39,9
9	8,6	22	19,8	35	42,2
10	9,2	23	21,1	36	44,6
11	9,8	24	22,4	37	47,1
12	10,5	25	23,8	38	49,7

ГЛОССАРИЙ

Абсолютно твердое тело – система материальных точек, расстояние между которыми не изменяются в данной задаче. Абсолютно твердое тело обладает только поступательными и вращательными степенями свободы.

Абсолютный показатель преломления света – отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде. Абсолютный показатель преломления света показывает во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в данной среде.

Вес тела – сила, с которой тело, находящееся в силовом (гравитационном) поле, действует на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес. Значит, вес приложен к опоре, к подвесу, но не к телу.

Видимое излучение – электромагнитное излучение, вызывающее зрительное ощущение и занимающее участок спектра от 380 до 780 нм. Световые излучения различных частот воспринимаются человеком как разные цвета.

Волновая оптика – раздел оптики, изучающий явления, в которых проявляется волновые свойства света.

Геометрическая оптика – раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах, основанные на представлении о световых лучах. Основными законами геометрической оптики являются: - закон прямолинейного распространения света; - закон независимых световых пучков; - закон отражения; - закон преломления.

Двойное лучепреломление – раздвоение светового луча при прохождении через оптически анизотропную среду, возникающее вследствие зависимости показателя преломления света от его поляризации. В одноосном двоякопреломляющем кристалле, например, в кристалле исландского шпата, падающий луч света расщепляется на два луча, обыкновенный и необыкновенный, имеющие разные показатели преломления и поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Дифракция света – отклонение от законов геометрической оптики, выражающееся в огибании светом малых препятствий. Дифракция наблюдается при распространении света в среде с резко выраженными неоднородностями.

Диэлектрик – вещество, обладающее низкой удельной электрической проводимостью. Идеальный диэлектрик вообще не проводит ток, его проводимость равна нулю. К диэлектрикам относятся пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, электреты и др.

Закон отражения света – закон, определяющий взаимное расположение при зеркальном отражении падающего и отраженного лучей, а также перпендикуляра, восстановленного к границе раздела двух сред в точке падения: -1- оба луча и перпендикуляр лежат в одной плоскости; -2- угол падения равен углу отражения.

Закон сохранения момента импульса – физический закон, в соответствии с которым момент импульса замкнутой системы относительно любой неподвижной точки не изменяется со временем. Закон сохранения момента импульса есть проявление изотропности пространства.

Замкнутая система в механике это совокупность физических тел, у которых взаимодействия с внешними телами отсутствуют или скомпенсированы.

Зонная теория твердого тела – квантовая теория энергетического спектра электронов в кристалле. Согласно зонной теории этот спектр состоит из чередующихся зон (полос) разрешенных и запрещенных энергий. Зонная теория хорошо объясняет ряд явлений, в частности разный механизм электропроводности металлов, диэлектриков и полупроводников.

Импульс – произведение массы (точечного) тела на скорость в конкретной системе отсчета. Импульс механической системы равен векторной сумме импульсов всех частей системы. В системе СИ единицей импульса является килограмм-метр в секунду.

Индуктивность – физическая величина, характеризующая связь между скоростью изменения тока в проводнике (катушке) и возникающей при этом ЭДС самоиндукции. Индуктивность проводника (катушки) зависит от его размеров и формы, числа витков, а также от материала магнитопровода. Единицей индуктивности в СИ является 1 Генри.

Инертность – свойство материальных объектов приобретать разные ускорения при одинаковых внешних воздействиях со стороны других тел. Мерой инертности тела в поступательном движении является его масса, а при вращательном движении – момент инерции.

Инерция – явление сохранения скорости прямолинейного равномерного движения или состояния покоя при компенсации внешних воздействий. Инерция присуща всем материальным объектам в одинаковой степени. Движение по инерции – движение тела, происходящее без внешних воздействий.

Интерференция света – оптическое явление, возникающее при сложении двух или нескольких когерентных световых волн, линейно поляризованных в одной плоскости. Интерференция представляет собой устойчивую во времени картину усиления или ослабления результирующих световых колебаний в различных точках пространства.

Источник света – излучатель электромагнитной энергии в видимой части спектра. Источники света подразделяются на естественные (Солнце, Луна и т. д.) и искусственные (лампы накаливания, газоразрядные лампы и др.).

Источник тока – источник электрической энергии, в котором действуют сторонние силы, разделяющие электрические заряды. Источник тока характеризуется электродвижущей силой и внутренним сопротивлением. Источниками тока являются гальванические элементы, аккумуляторы, машины постоянного тока и др.

Квантовая оптика – раздел оптики, изучающий явления, в который обнаруживаются квантовые свойства электромагнитного излучения (света). Это тепловое излучение, фотоэффект, эффект Комптона и др.

Кинетическая энергия – энергия механической системы, зависящая от скоростей ее точек. Если тело массы m движется со скоростью v , то его кинетическая энергия равна $mv^2/2$.

Колебания – это периодически повторяющиеся движения. Колебания, описываемые законом синуса $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ или косинуса $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, называются гармоническими. Величина, стоящая под знаком гармонической функции $(\omega t + \varphi)$, называется фазой; ω называется круговой (или циклической) частотой; φ – начальной фазой. Колебания разной природы описываются математически совершенно одинаково.

Лазеры (от первых букв англ. фразы Light amplification by stimulated emission of radiation) – квантовые генераторы света, принцип действия которых основан на явлении вынужденного (стимулированного) излучения. Излучение лазеров поляризовано, обладает монохроматичностью, большой мощностью в узком спектральном диапазоне и малой расходимостью светового пучка. Находят широкое применение в технике и экспериментальной физике.

Магнитное поле – одна из сторон единого электромагнитного поля. Магнитное поле создается движущимися зарядами (током проводимости) и переменным электрическим полем (током смещения). Действует магнитное поле только на движущиеся заряды.

Масса – мера инертных и гравитационных свойств тела. Масса не зависит от скорости. Измеряется в [кг].

Математический маятник – механическая колебательная система, состоящая из материальной точки, подвешенной на тонкой, невесомой и нерастяжимой нити или на невесомом стержне в поле сил тяжести. Период малых колебаний математического маятника не зависит от амплитуды и определяется по формуле: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$.

Материальной точкой называется тело, размеры и форма которого в данной задаче не существенны. Материальную точку часто называют телом.

Момент инерции – скалярная величина, характеризующая распределение масс в теле, и являющаяся мерой инертности тела при вращательном движении. Момент инерции тела относительно заданной оси вращения равен сумме произведений элементарных масс всех малых частей (материальных точек) тела на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси $I = \sum m_i \cdot r_i^2$.

Неинерциальная система отсчета – система отсчета, в которой не выполняется первый закон Ньютона. Неинерциальная система отсчета движется с ускорением относительно некоторой инерциальной системы отсчета. Важным классом неинерциальных систем являются вращающиеся системы отсчета.

Нормальное ускорение – составляющая ускорения, направленная вдоль нормали к траектории движения в данной точке. Нормальное ускорение характеризует изменение скорости по направлению $a_n = \frac{v^2}{r}$.

Оптика – раздел физики, в котором изучаются закономерности оптических явлений, природа света и его взаимодействия с веществом.

Полупроводниками называется класс веществ, занимающих по своей способности проводить электрический ток промежуточное положение между металлами и диэлектриками. С точки зрения зонной теории твердого тела вещество относится к полупроводникам, если ширина запрещенной зоны, отделяющей валентную зону от зоны проводимости, меньше 2 эВ.

Поляризатор – прибор, предназначенный для получения полностью или частично поляризованного света. Поляризатор можно использовать в качестве анализатора поляризованного излучения.

Поляризация света – ориентация векторов напряженности электрического поля и магнитной индукции световой волны в плоскости, перпендикулярной световому лучу. Обычно поляризация возникает при отражении и преломлении света, а также при распространении света в анизотропной среде. Различают линейную, круговую и эллиптическую поляризацию света.

Постоянным называется электрический ток, не меняющийся с течением времени. В случае постоянного тока при определении силы тока $I = \Delta q / \Delta t$ можно брать любой промежуток времени Δt .

Потенциал электростатического поля ϕ – энергетическая характеристика поля. Определяется как величина, измеряемая работой сил поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки в другую, фиксированную точку. В качестве фиксированной часто берут бесконечно удаленную точку. Другими словами, потенциал электростатического поля равен потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку. Единица потенциала в СИ 1 Вольт.

Потенциальная энергия – часть механической энергии тела, зависящая от взаимного расположения ее частей и от их положений во внешнем силовом поле. Численно потенциальная энергия системы в данном состоянии равна работе, которую произведут действующие на систему силы при переходе системы из этого положения в то, где потенциальная энергия условно принимается равной нулю.

Преломление света – явление, заключающееся в изменении направления распространения световой волны при переходе из одной среды в другую, отличающуюся показателем преломления света.

Проводниками называются вещества, содержащие в достаточной концентрации свободные заряды. К проводникам относятся металлы, ионизированные газы, водные растворы электролитов и расплавы солей. В электрическом поле свободные заряды перераспределяются так, что напряженность электрического поля внутри проводника оказывается равна нулю, а потенциал проводника всюду одинаков.

Работа в механике есть мера изменения полной механической энергии систем. Элементарная работа определяется как скалярное произведение *силы* на элементарное *перемещение* $A=F \cdot S$. Измеряется в [Дж].

Равномерное вращательное движение – движение, при котором углы поворота материальной точки за любые равные промежутки времени одинаковы.

Равномерное движение – движение, при котором за любые равные промежутки времени материальная точка проходит одинаковые пути.

Равномерное прямолинейное движение – то же самое, что и Равномерное движение, если траектория тела – прямая линия.

Самоиндукция – явление возникновения электродвижущей силы в проводнике (катушке) при изменении протекающего в ней электрического тока. Величина и знак ЭДС самоиндукции определяются законом электромагнитной индукции.

Сила – мера механического действия на материальную точку или тело других тел или полей. Сила вызывает изменение скорости тела или его деформацию. В механике различают силы, возникающие при непосредственном контакте тел или на расстоянии посредством создаваемых телами полей. Можно показать, что на микроскопическом уровне все силы (например, сила упругости) обусловлены полями. Сила – векторная величина, поэтому в каждый момент времени она характеризуется числовым значением, направлением и точкой приложения. В механике природа сил не рассматривается. Единица силы в СИ – 1 Ньютон.

Силы инерции – фиктивные силы, которые вводятся в неинерциальных системах отсчета, чтобы второй закон Ньютона можно было распространить на неинерциальные системы отсчета. Например, во вращающихся системах отсчета появляются центробежная сила и сила Кориолиса.

Система отсчета – тело отсчета, система координат, связанная с телом отсчета, и часы (прибор для измерения времени движения с указанием на начало его отсчета). Система отсчета используется для определения положения в пространстве физических объектов в различные моменты времени. Различают инерциальные и неинерциальные системы отсчета.

Тело отсчета – тело, относительно которого рассматривается движение всех остальных тел.

Точечный электрический заряд – заряженное тело, размерами которого можно пренебречь в условиях конкретной задачи.

Трансформатором называется устройство для преобразования переменного тока и напряжения. Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции.

Физический маятник – абсолютно твердое тело, имеющее ось вращения. В поле тяготения физический маятник может совершать колебания около положения равновесия, при этом массу системы нельзя считать сосредоточенной в одной точке. Период колебаний физического маятника зависит от момента инерции тела и от расстояния от оси вращения до центра масс.

Центр масс – точка тела (или системы тел), которая движется так, как если бы в ней была сосредоточена вся масса тела (системы) и если бы к ней были приложены все внешние силы, действующие на систему. Другое название этой точки – центр инерции. Система отсчета, связанная с центром масс, называется Ц-системой или системой центра масс. В такой системе удобно решать задачи, если нас не интересует движение системы в целом, а только относительное движение ее частиц.

Электрический заряд – физическая величина, характеризующая свойство тел или частиц вступать в *электромагнитное взаимодействие* и определяющая значения сил и энергий при таких взаимодействиях. Электрическим зарядам приписывают положительный или отрицательный знак. Единица заряда в системе СИ – 1 Кл (кулон).

Электрический ток – это направленное (упорядоченное) движение *электрических зарядов*. Различают ток проводимости (движение заряженных микрочастиц движутся внутри макроскопического тела), конвекционный ток (движение заряженных макроскопических тел или частиц, например, частиц пыли) и ток в вакууме (пучки электронов или ионов в вакууме).

Электродвижущая сила – характеристика источника энергии в электрической цепи. Электродвижущая сила измеряется отношением работы *сторонних сил* по перемещению заряда вдоль цепи к значению этого заряда. Можно сказать, что ЭДС есть удельная работа сторонних сил. ЭДС, как и *потенциал*, измеряется в вольтах $\varepsilon = A_{ст}q$.

Электрон – мельчайшая отрицательно заряженная частица, входящая в состав атомов.

Электростатика – раздел *электродинамики*, изучающий поле неподвижных зарядов и их взаимодействие. Основу электростатики составляет *закон Кулона*.

Элементарный электрический заряд – наименьший положительный или отрицательный электрический заряд, равный по абсолютному значению заряду электрона. Заряд любого тела или частицы есть величина, кратная элементарному заряду. Частицы с дробным зарядом в свободном состоянии не наблюдаются.

Энергия – скалярная физическая величина, являющаяся общей мерой различных форм движения материи и мерой перехода движения материи из одних форм в другие. Основные виды энергии: механическая, внутренняя, электромагнитная, химическая, гравитационная, ядерная. Одни виды энергии могут превращаться в другие в строго определенных количествах.

Энергия, запасенная в *магнитном поле* катушки, равна $W = LI^2/2$, где I – *сила тока*, L – *индуктивность* катушки (ср. с формулой кинетической энергии!).

Энергия, запасенная в электрическом поле *конденсатора*, равна $W = CU^2/2$, где U – напряжение на конденсаторе, C – *емкость конденсатора*.

Явление сверхпроводимости открыл голландский физик Камерлинг-Оннес (1911): сопротивление ртути при температуре, близкой к абсолютному нулю, скачком уменьшалось до нуля. В дальнейшем сверхпроводимость была обнаружена и у других металлов и сплавов (свинец, олово, железо и др.). Сверхпроводимость, как и электрическое сопротивление, объясняется взаимодействием коллективизированных электронов металла с кристаллической решеткой. В 1986 году обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость, теория которой находится в стадии разработки.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
 РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 Федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

Направление подготовки/специальность	18.03.01 Химическая технология
Направленность профиль)/специализация	Химическая технология синтетических биологически активных веществ, химико- фармацевтических препаратов и косметических средств
Год начала обучения	2025
Форма обучения	очная
Реализуется в семестре	2

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	4
Лабораторная работа №1. Методика обработки измерений	5
Лабораторная работа № 2. Определение плотности вещества твердого тела	12
Лабораторная работа №3. Равноускоренное движение	22
Лабораторная работа №4. Вращательное движение с равномерным ускорением	26
Лабораторная работа №5. Параллелограмм сил	30
Лабораторная работа №6. Исследование законов механических колебаний с помощью крутильного маятника поля	36
Литература	40

Введение

Физика – наука экспериментальная. Эксперимент является важной необходимой частью всего процесса научного познания, который в целом можно представить состоящим из трех этапов:

1. Восприятие или первичное изучение конкретного физического явления при помощи наблюдения.

2. Обобщение или создание гипотезы, которая связывает отдельные результаты наблюдений между собой и с другими известными фактами и устанавливает между ними определенные количественные соотношения.

В процессе этого обобщения иногда возникает необходимость в дополнительных данных – проводятся дополнительные наблюдения и специальные эксперименты.

3. Проверка гипотезы на практике в реальных условиях, т.е. при наличии отброшенных ранее второстепенных факторов. Если практика подтверждает гипотезу, то последняя становится теорией, а установленные ее соотношения получают ранг законов. Если же нет – учитываются новые факторы, которые первоначально казались второстепенными и отбрасывались. Устанавливаются новые соотношения и снова производится их проверка на практике. И так далее.

Однако процесс научного познания данного явления на этом не заканчивается. С течением времени появляются новые опытные данные, которые приходят в противоречие с известной теорией. Возникает новая теория, соответствующая данному этапу развития эксперимента и науки в целом. Затем она может быть заменена еще более новой и полной теорией и т.д. Таким путем процесс познания продолжается бесконечно.

Хотя эксперимент не является единственным средством научного исследования, но его роль как источника исходных данных и критерия истинности любой теории является решающей. Поэтому на экспериментаторе, проводящем те или иные исследования, лежит громадная ответственность. От результатов его опытов зависит не только судьба соответствующей теории, но и, как это часто бывало в физике, все развитие науки на довольно продолжительное время. Эксперимент должен планироваться и проводиться так, чтобы свести к минимуму все возможные ошибки и чтобы его результаты не имели неоднозначного толкования.

Все изложенное выше определяет роль и место лабораторного практикума в процессе изучения физики. В лаборатории студент решает самостоятельно ряд экспериментальных задач. Во-первых, он должен научиться самостоятельно воспроизводить и анализировать основные физические явления. Во-вторых, он должен получить первичные навыки работы в физической лаборатории. В-третьих, студент должен научиться простейшим методам обработки экспериментальных результатов и их анализа. Полученный опыт в лаборатории физики студент должен успешно применять при выполнении лабораторных работ в курсах последующих дисциплин.

В соответствии с государственными образовательными стандартами и учебными планами изучения курса физики для инженерно-технических специальностей лабораторный практикум содержит методические указания к работам по различным разделам физики: механика, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая и квантовая оптика, физика твердого тела, физика атома.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

Вход в лабораторию осуществляется только по разрешению преподавателя.

~ На первом занятии преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности и напоминает студентам о бережном отношении к лаборатории и о материальной ответственности каждого из них за сохранность оборудования и обстановки лаборатории.

~ При обнаружении повреждений оборудования персональную ответственность несут студенты, выполнявшие лабораторную работу на этом оборудовании. Виновники обязаны возместить материальный ущерб институту.

~ При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие комплектности оборудования и соединительных проводов (в случае отсутствия, какого либо элемента, необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю).

~ Если во время проведения опыта замечены какие-либо неисправности оборудования, необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю.

~ После окончания лабораторной работы рабочее место привести в порядок.

~ Будьте внимательны, дисциплинированы, осторожны, точно выполняйте указания преподавателя.

~ Не оставляйте рабочего места без разрешения преподавателя.

~ Располагайте приборы, материалы, оборудование на рабочем месте в порядке, указанном преподавателем.

~ Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении задания.

~ Перед тем как приступить к работе, уясните ход ее выполнения.

~ Постоянно следите за исправностью всех креплений в приборах, предназначенных для вращения.

~ При выполнении опыта колебаний груза на стальном полотне или подвешенного на нити груза, следует надежно укрепить груз, чтобы он не сорвался.

~ При изучении свободного падения тел на пол следует положить мешочек с песком.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель лабораторной работы – научиться методики обработки измерений

Оборудование и материалы: предметы различной геометрической формы для измерений, измерительные приспособления (линейка, сантиметр и т.д.)

1. Теоретическое введение

1.1 Виды измерений

Измерения, при которых получают непосредственно значения измеряемой величины, называются прямыми.

Пример: линейкой измеряют длину предмета; с помощью весов измеряют массу предмета.

Если для определения искомой величины требуется провести математические действия над результатами прямых измерений, то такие измерения называются косвенными.

Пример: определение скорости по известному пути и времени; определение плотности тела по известной массе и объему (измерение объема может являться и прямым, и косвенным измерением).

1.2 Виды ошибок при измерениях

Как непреложную истину следует запомнить: физическую величину нельзя измерить абсолютно точно. При измерении мы всегда допускаем большую или меньшую ошибку. Поэтому при физических измерениях важно определить не только физическую величину, но и ошибку, допускаемую при ее определении.

1.3 Ошибки систематические, случайные, промахи

Какие же ошибки могут быть допущены при измерениях? Различают три основных типа ошибок: систематические, случайные, промахи.

Систематические ошибки - ошибки, обусловленные действием какого-либо постоянного фактор (неточность изготовления приборов, неправильный выбор метода измерений).

Пример. При измерениях не учитывается тепловое расширение тел, дефект при изготовлении приборов (штрихи на линейке нанесены неравномерно). При вычислениях с числом 2π считают, что число 2π равно: 3; 3,1; 3,14 вместо 3,14159265.

Таким образом, систематические ошибки вызваны действием вполне определенных факторов, которые могут быть учтены и исключены. Но на практике решение этой проблемы оказывается достаточно сложным делом.

Случайные ошибки - ошибки, связанные с действием внешних факторов, которые не одинаковы для каждого опыта и не могут быть учтены.

Пример. При считывании показаний по шкале величина считываемого результата зависит от положения глаза наблюдателя по отношению к стрелке, которое может изменяться в каждом эксперименте.

Случайные ошибки нельзя учесть, но их действие можно уменьшить, проводя не одно, а несколько измерений, и чем более точно мы хотим провести измерение, тем большее число опытов мы должны проделать. При этом следует иметь в виду, что если случайная ошибка окажется значительно меньше систематической, то не имеет смысла уменьшать случайную ошибку.

Промахи – ошибки, допущенные экспериментатором вследствие недостатка внимания.

Этот вид ошибок исчезает при тщательной и аккуратной записи результатов, их обработке и при внимательном считывании показаний приборов.

1.4 Приборная ошибка

Особо следует отметить понятие ²приборная ошибка² - это ошибка, вносимая прибором в измерение. Эта ошибка может быть как систематической (неправильная установка прибора, неверный режим использования, класс прибора, влияние какого-либо постоянного внешнего фактора), так и случайной (воздействие случайных внешних факторов – сотрясение, нерегулярно проявляющиеся внутренние особенности данного прибора, например, при плавном изменении силы тока прибор покажет одно значение, а при скачкообразном (вследствие трения) – возможно другое значение). Поэтому при всех измерениях необходимо учитывать приборную ошибку, в особенности необходимо обращать внимание на класс точности прибора. Класс точности определяет минимально возможную ошибку (следовательно, максимально возможную точность) при работе с данным прибором.

1.5 Абсолютная и относительная ошибки

При проведении физических экспериментов в научных лабораториях требуется достижение наибольшей возможной точности. Поэтому обработке результатов уделяется большое внимание. Существуют сложные теоретические расчеты, позволяющие достаточно точно определить точность измерения. Они используют методы математической статистики и теории вероятностей. В студенческом лабораторном практикуме не требуется высокой точности, поэтому использование сложных методов расчета ошибок не имеет смысла. Мы будем пользоваться упрощенной схемой расчета ошибок, которая, тем не менее, использует фундамент более сложных методов.

Итак, в силу того, что физическую величину нельзя измерить абсолютно точно, мы должны получить не число, а некоторый ряд чисел, среди которых с большой долей вероятности находится истинное значение определяемой величины.

Пусть A – истинное значение измеряемой величины. При измерении были получены значения: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Тогда результат каждого измерения отличается от истинного значения на величину

$$\begin{aligned} DA_1 &= A - A_1 | \\ DA_2 &= A - A_2 | \\ &\dots \dots \dots \text{.DSMT4} \\ DA_n &= A - A_n | \end{aligned} \quad (1.1)$$

Суммируя левые и правые части (1.1), получим

$$\sum_{i=1}^n DA_i = n \times A - \sum_{i=1}^n A_i \text{.DSMT4.} \quad (1.2)$$

Введем важное предположение о том, что если ошибки DA_i случайны, то суммарная ошибка измерения равна нулю, т.к. в одном эксперименте мы, равновероятно, можем получить как положительную, так и отрицательную ошибку. Тогда при большом количестве измерений $\langle A \rangle \approx A$, где $\langle A \rangle$ - среднее значение измеряемой величины.

$$\langle A \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \text{.DSMT4.} \quad (1.3)$$

Так как в студенческом лабораторном практикуме нет достаточно времени для проведения большого числа экспериментов, то будем считать, что $\langle A \rangle = A$ при $1 \leq n \leq 6$. Тогда ошибка при каждом измерении запишется в виде

$$\Delta A_n = \frac{1}{2} \langle A \rangle - A_n \frac{1}{2}. \quad (1.4)$$

ΔA_n называется абсолютной ошибкой измерений. Более точно: абсолютной ошибкой измерения называется именованное (т.е. имеющее размерность) число, показывающее максимально возможное отличие истинного значения измеряемой величины от полученного в эксперименте

$$\langle A \rangle - \Delta A_n \leq A \leq \langle A \rangle + \Delta A_n.$$

Интервал, в который попадает истинное значение измеряемой величины, называется доверительным интервалом. Следовательно, при записи результатов измерений мы будем записывать доверительный интервал.

Так как в каждом измерении мы допускаем свою ошибку, то необходимо определить, какую ошибку мы запишем как итоговую ошибку всего эксперимента.

В случае небольшого числа измерений будем считать, что ошибка эксперимента - среднее арифметическое ошибок, допущенных при измерениях

$$\langle \Delta A \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta A_i. \text{ DSMT4.}$$

Тогда итоговый результат запишется в виде

$$A = \langle A \rangle \pm \langle \Delta A \rangle, \text{ или } A = A_{\text{ср}} \pm \Delta A_{\text{ср}}.$$

Если число измерений три или меньше трех, то ошибка эксперимента – наибольшая из полученных ошибок измерений.

Пример: $\Delta A_1 = 0,2$, $\Delta A_2 = 0,1$, $\Delta A_3 = 0,3$, тогда ошибка эксперимента: $\Delta A = 0,3$.

Абсолютная ошибка дает сведения только об интервале, в котором лежит значение измеряемой величины, но ничего не говорит о точности измерений.

Пример. При некоторых измерениях мы допускаем ошибку $\Delta A = 1 \text{ см}$. Если эта ошибка допускается при измерении расстояния от Ставрополя до Невинномысска, то это высокая точность. Если же эта ошибка допускается при измерении размеров коробка спичек, то это низкая точность.

Сведения о точности измерений дает относительная ошибка.

Относительная ошибка – это отношение абсолютной ошибки к значению измеряемой величины (в дальнейшем мы опускаем слово «средний»²).

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{A} \times 100\%.$$

То есть относительная ошибка показывает, какую долю составляет абсолютная ошибка от значения измеряемой величины. Она измеряется или в процентах, или остается величиной безразмерной, если ее не умножать на 100 %.

Относительная ошибка служит также для сравнения точности разноименных измерений.

Пример. Пусть длина стержня составляет $a = 25,2 \pm 0,8 \text{ см}$, а его масса $m = 315 \pm 4 \text{ г}$. Что измерено точнее?

Для ответа на этот вопрос найдем относительную ошибку каждого измерения.

$$e_a = \frac{Da}{a} = \frac{0,8}{25,2} \times 100\% = 3\%,$$

$$e_m = \frac{Dm}{m} = \frac{4}{315} \times 100\% = 1,3\%.$$

Видно, что массу стержня мы измерили точнее. Поэтому при записи результатов эксперимента мы должны указать не только величину абсолютной, но и величину относительной ошибки.

1.6 Задание и методика обработки прямого и косвенного измерения

Прямое измерение

1. Делаем серию измерений (5 – 7) измеряемой величины.
2. Находим среднее значение измеряемой величины

$$A_{cp} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n A_i \text{ .DSMT4.}$$

3. Находим абсолютную ошибку каждого измерения
 $DA_n = \sqrt{A_{cp}^2 - A_n^2}$.

4. Находим среднюю абсолютную ошибку

$$DA_{cp} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n DA_i \text{ .DSMT4.}$$

5. Находим относительную ошибку

$$e = \frac{DA_{cp}}{A_{cp}} \times 100\%.$$

6. Записываем ответ в виде

$$A_{cp} \pm DA_{cp} = \dots$$

$$e = \frac{DA_{cp}}{A_{cp}} \times 100\% = \dots$$

Во всех случаях записи именованных величин нужно указать их размерность.

Косвенное измерение

При обработке косвенных измерений будем считать, что при небольшом количестве измерений ошибки накапливаются, т.е. ошибка косвенного измерения - сумма ошибок величин, входящих в косвенное измерение.

Производя измерения, надо стремиться к тому, чтобы точность измерений приближалась к точности прибора. При этом выполняется ряд правил, которые мы сейчас докажем.

Пусть имеются величины $(A \pm DA)$ и $(B \pm DB)$, где A, B – измеренные значения этих величин, DA и DB – абсолютные ошибки, допущенные при измерении этих величин.

Правило 1

Если $C = A + B$ или $C = A - B$, то $DC = DA + DB$.

Доказательство: $C = A + B$ или $C = A - B$,

тогда: $C \pm DC = A \pm DA + B \pm DB$ или $C \pm DC = A \pm DA - B \pm DB$.

Вычитая из второго равенства первое, получим:

$$\pm DC = \pm DA \pm DB.$$

Для небольшого числа измерений считаем, что ошибки накапливаются, следовательно:
 $DC = DA + DB.$

Правило 2

Если $C = A \cdot B$ или $C = \frac{A}{B}$ то $\frac{DC}{C} = \frac{DA}{A} + \frac{DB}{B}$.

Доказательство: Пусть $C = A \cdot B$, тогда

$$C \pm DC = (A \pm DA) \cdot (B \pm DB) = A \cdot B \pm A \cdot DB \pm B \cdot DA \pm DA \cdot DB.$$

Пренебрегаем $(DA \cdot DB)$, тогда:

$$C \pm DC = (A \pm DA) \cdot (B \pm DB) = A \cdot B \pm A \cdot DB \pm B \cdot DA$$

$$\Rightarrow DC = A \cdot DB \pm B \cdot DA$$

$$\Rightarrow \frac{DC}{C} = \frac{A \cdot DB \pm B \cdot DA}{A \cdot B} = \frac{DB}{B} \pm \frac{DA}{A} \quad \text{или} \quad \frac{DC}{C} = \frac{DA}{A} + \frac{DB}{B}.$$

Если $C = \frac{A}{B}$, то $DC = D\left(\frac{A}{B}\right) = \frac{DA}{B} - \frac{A}{B^2} DB$,

или $DC = A \cdot D(B^{-1}) + DA \cdot (B^{-1})$, но $D(B^{-1}) = -B^{-2} \cdot DB$

$$\Rightarrow DC = \frac{B \cdot DA + A \cdot DB}{B^2}.$$

Разделим обе части на $C = \frac{A}{B}$ $\Rightarrow \frac{DC}{C} = \frac{DA}{A} + \frac{DB}{B}$.

То есть, в случае косвенного измерения, в котором проводятся действия вычитания и сложения, удобно сначала искать абсолютную ошибку, а затем относительную, если же проводятся действия умножения, деления, а также возведения в степень, то сначала удобно искать относительную ошибку, а затем уже абсолютную.

В общем случае для нахождения относительной ошибки поступают следующим образом

- 1) логарифмируют выражение;
- 2) дифференцируют полученное выражение;
- 3) заменяют $^2d^2$ на $^2D^2$ и $^{2-2}$ на $^{2+2}$ между ошибками (так как $d(\ln x) = dx/x$ или $D(\ln x_{\text{ср}}) = Dx$

/ $x_{\text{ср}}$.

Пример

$$A = \frac{k \sqrt{p}}{(a-b)^3}. \text{DSMT4, ищем } \frac{DA}{A}. \text{DSMT4.}$$

$$1) \ln A = \ln k + (1/2) \cdot \ln p - 3 \cdot \ln(a-b);$$

$$2) \frac{dA}{A} = \frac{dk}{k} + \frac{dp}{2 \cdot p} - 3 \frac{d(a-b)}{a-b};$$

$$3) \frac{DA}{A} = \frac{Dk}{k} + \frac{Dp}{2 \cdot p} + 3 \frac{Da + Db}{a-b}.$$

1.7 Как учесть приборную ошибку

Приборная ошибка указывается на приборе или в паспорте к нему. Может быть указана как абсолютная ошибка, даваемая прибором (например, цена деления на линейке 1 мм), так и

относительная ошибка. Величина относительной ошибки определяется классом точности прибора.

Различают классы точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности указывается на лицевой панели прибора. При этом возможны два случая.

1. Класс точности дается в виде числа, не заключенного в кружок. В этом случае указывается величина приведенной ошибки, то есть ошибки, выраженной в процентах от верхнего предела измерений или от длины шкалы. Например, если имеется амперметр, рассчитанный на измерение 100А, с классом точности 0,5, это означает, что приборная ошибка $\Delta I_{\text{приб}}$ определяется по формуле

$$\Delta I_{\text{приб}} = \frac{0,5}{100} \times I_{\text{max}},$$

где $I_{\text{max}} = 100\text{А}$.

Тогда $\Delta I_{\text{приб}} = 0,5\text{А}$, т.е. абсолютная приборная ошибка измерений составляет 0,5А, в любом диапазоне изменений прибора. А относительная ошибка будет наибольшей в начале шкалы прибора, а наименьшей – в конце шкалы.

2. Класс точности дается в виде числа, заключенного в кружок. В этом случае относительная ошибка указывается в процентах от измеряемой величины. Абсолютная ошибка измерения определяется по формуле

$$\Delta I_{\text{приб}} = \frac{k}{100} \times I,$$

где k – класс точности;

I – измеряемое значение тока.

Пусть амперметром с классом точности 0,5 измерили величину тока и получили $I = 20\text{А}$.

Тогда приборная ошибка будет

$$\Delta I_{\text{приб}} = \frac{0,5}{100} \times 20 = 0,1\text{А}, \quad e = 0,5\%.$$

В случае измерений, проводимых несколькими приборами, приборная ошибка эксперимента – сумма ошибок, даваемых каждым прибором в отдельности. Очевидно, что экспериментальная ошибка не может быть меньше приборной ошибки, поэтому всегда из двух возможных ошибок записываем большую – как более реальную.

1.8 Как правильно произвести вычисления и записать ответ

Конечным итогом любого эксперимента является получение некоторого численного значения какой-либо величины; неправильность итоговой записи результата может дать неверные сведения о точности измерения и о значении самой измеряемой величины. Поэтому условимся, что при косвенных измерениях количество значащих цифр в конечном результате может быть лишь на 1 больше, чем среднее арифметическое количества значащих цифр всех величин, входящих в данное измерение, (напомним, что значащие цифры – все цифры, кроме 10^2 , стоящего в начале числа).

Пример: $\frac{100}{3} = 33,3;$

100 – три значащих цифры;

3 – одна значащая цифра;

$$N_{\text{ср}} = (3 + 1) / 2 = 2;$$

33,3 – три значащие цифры $\text{т.к. } 3 > 2$ на единицу.

При записи ошибки измерения необходимо руководствоваться двумя правилами.

Первое правило: при записи ошибки измерения (абсолютной или относительной) условимся, что если первая значащая цифра в ошибке “1” или “2”, то можем оставить две

значащие цифры, если же “3” или выше – одну значащую цифру.

Пример: 2,5 – верно 2,51 – неверно
 0,3 – верно 0,32 – неверно
 7 – верно 7,0 – неверно

Второе правило: при записи ошибки разряд, до которого определена ошибка, должен совпадать с разрядом, до которого определена измеряемая величина, или абсолютная ошибка должна заканчиваться в том же разряде, что и результат.

Пример: $27,5 \pm 0,12$ – неверно;
 $27,5 \pm 0,1$ – верно.

Применение этих двух правил необходимо выполнять в той последовательности, в которой они даны в изложении.

Приведем ряд примеров. Пусть были произведены измерения, определены их ошибки, сделаны записи

- 1) $27,12 \pm 0,18$;
- 2) $27,12 \pm 1,8$;
- 3) $27,12 \pm 0,018$;
- 4) $27,12 \pm 3,1$;
- 5) $27,12 \pm 0,31$;
- 6) $27,12 \pm 0,031$;
- 7) $27,12 \pm 3$.

Применяя эти два правила, проверим правильность записи ответов, и если они верны – оставим их без изменений, а если неверны – запишем их правильно

- 1) оба правила выполнены.
- 2) правило 1 выполнено, 2 – нет **Р** правильный ответ: $27,1 \pm 1,8$;
- 3) 1 – выполнено, 2 – нет **Р** $27,12 \pm 0,02$;
- 4) 1 – не выполнено, 2 – не выполнено **Р** 27 ± 3 ;
- 5) 1 – не выполнено **Р** $27,12 \pm 0,3$, теперь 2 – не выполнено **Р** $27,1 \pm 0,3$;
- 6) 1 – не выполнено, 2 – не выполнено, поэтому верно $27,12 \pm 0,03$;
- 7) 1 – выполнено, 2 – нет **Р** 27 ± 3 .

Пользуясь вышеуказанными правилами, мы можем грамотно оформить свою работу, причем результаты этой работы будут понятны любому, кого они интересуют.

Окончанием работы должен служить ответ, записанный в виде:

$$C \pm DC = \dots$$

$$e = \frac{DX}{X} \times 100\% = \dots$$

1.9 Содержание отчета

1. Лабораторная работа № ...
2. Наименование работы.
3. Цель работы.
4. Приборы и материалы.
5. Чертеж или схема установки (если требуется).
6. Формулы искомых величин и их погрешностей.
7. Таблица с результатами измерений и вычислений погрешностей (если требуется).
8. Вычисления результатов.
9. Окончательный результат, вывод и прочее (согласно цели работы).

В выводе необходимо ответить на вопросы:

- что вы делали, в чём цель вашей работы;
- какие результаты вы ожидали получить;

- совпали ли результаты вашей работы с ожидаемыми.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель лабораторной работы: ознакомиться с устройством и принципом работы простейших измерительных приборов (штангенциркуль, микрометр, аналитические и технические весы), научиться применять теорию ошибок при определении численного значения измеряемой величины.

2.1 Оборудование и материалы

1. Микрометр.
2. Штангенциркуль.
3. Весы технические.
4. Весы аналитические.
5. Тело, плотность вещества которого надо определить.

2.2 Теоретическое введение

Умение измерять линейные и угловые величины с разной степенью точности, допустимой механическими средствами, правильное пользование техническими и аналитическими весами необходимы в большинстве других лабораторных работ, поэтому предлагаемая работа должна предшествовать всем остальным.

2.3 Описание измерительных устройств и экспериментальной методики

2.3.1 Нониус

Измеряя длину какого-либо тела миллиметровой линейкой, можно определить ее с точностью до 0,5 – 1 мм, т.е. ошибка будет равна 0,5 – 1 деления шкалы.

Для увеличения точности измерения линейки используют дополнительную шкалу, называемую нониусом. Нониус свободно перемещается вдоль основной шкалы.

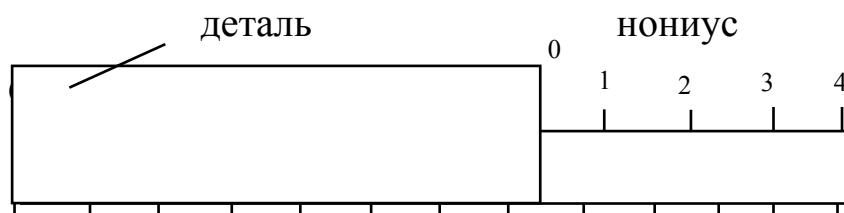
Для измерения угловых величин нониус перемещается вблизи шкалы, указывающей градусы.

Нониус – это шкала, подобная основной, но ее деления на определенную часть меньше делений основной шкалы, например, на одну десятую долю. Тогда на десять делений нониуса будет приходиться девять делений основной шкалы (рисунок 2.1).

Если нониус смещен на 0,1 мм, то совпадет деление с нулевым делением на нониусе. Если же совпадет деление с цифрой 1 на нониусе, то совпадет деление с цифрой 1 на основной шкале. Если же совпадет деление 6 нониуса с каким-либо делением основной шкалы, то нониус смещен на $6 \cdot 0,1 \text{ мм} = 0,6 \text{ мм}$. Таким образом, можно тело расположить так, чтобы один его конец совпадал с нулевым делением основной шкалы, а другой – с нулевым делением нониуса.

Длина отрезка будет равна целому числу делений (мм) основной шкалы, отсчитанной до совпадения с нулевым делением нониуса, плюс дробная часть (десятые доли мм) нониуса до совпадения с нулевым делением основной шкалы.

Рисунок 2.1 – Нониус и основная шкала



На рисунке 2.2 показано расположение детали и нониуса. Измеряемая длина тела равна 7,3 мм, т.к. нуль нониуса располагается за цифрой 7 основной шкалы (7 мм) и деление 3 нониуса совпадает с делением 11 основной шкалы ($7 \text{ мм} + 0,3 \text{ мм} = 7,3 \text{ мм}$).

Был рассмотрен нониус с ценой деления 0,1мм. В практике встречаются нониусы с ценой деления 0,05 и 0,02 мм.

2.3.2 Штангенциркуль

Штангенциркуль служит для измерения наружных, внутренних размеров тел и глубин отверстий.

На рисунке 2.3 показан один из видов штангенциркуля. На корпусе (штанге) расположена основная шкала 1, нониус 2 расположен на раме, скользящей вдоль основной шкалы.

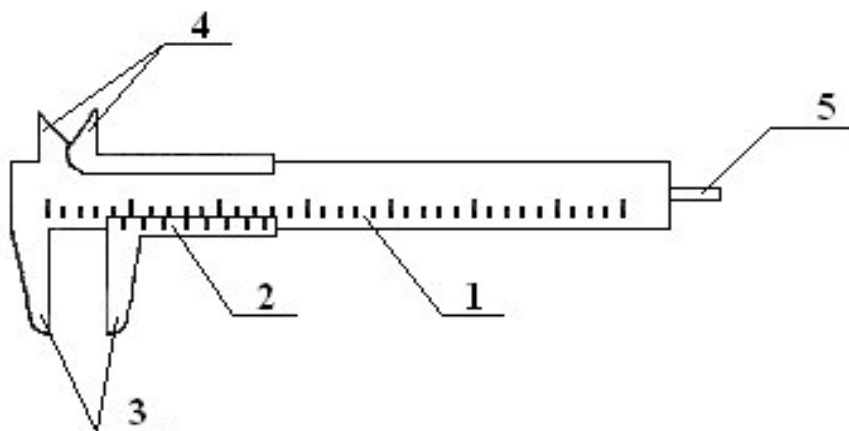


Рисунок 2.3 – Штангенциркуль

При измерении штангенциркулем наружных размеров деталь зажимается между губками 3. Губки 4 служат для измерения внутренних размеров, а глубиномер 5 – для измерения глубины глухих отверстий.

Показания при измерении снимаются по основной шкале до нулевого деления нониуса (в мм) плюс показания нониуса.

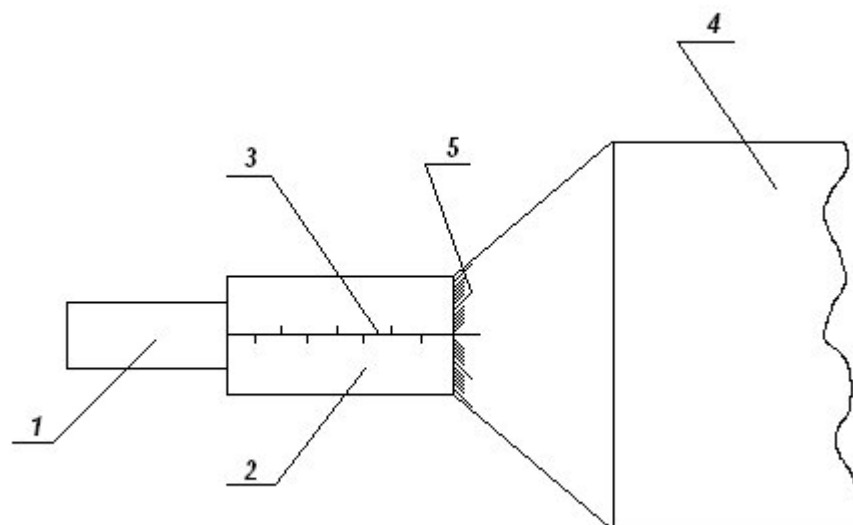
Существует несколько видов штангенциркулей. Они отличаются длиной штанги, типом и величиной измерительных губок, типом нониуса и наличием некоторых вспомогательных деталей, которые не рассматриваются в данном описании.

2.3.3 Микрометрический винт

Микрометрический винт применяется в точных измерительных приборах: микрометрах, микроскопах, поворотных устройствах и т.д. Он позволяет производить измерения с точностью до сотых и тысячных долей миллиметра или градуса.

Микрометрический винт представляет собой стержень 1 (рисунок 2.4), снабженный винтовой нарезкой и вращающийся в неподвижном держателе 2 с основной шкалой 3.

Как правило, ход винта равен 0,5 мм, поэтому при повороте на один оборот стержень смещается вдоль своей оси на 0,5 мм относительно неподвижной шкалы 3. Для учета меньшего осевого смещения стержня 1 на него насажен барабан 4 с нониусом 5, имеющим 50 делений.



При смещении стержня на $0,5$ мм, т.е. при одном обороте винта, мимо нулевой черты держателя 2 проходит 50 делений барабана. Таким образом, при повороте винта на одно деление нониуса винт смещается на $0,01$ мм, т.к. $0,5 \text{ мм} \cdot 1/50 = 0,01 \text{ мм}$.

2.3.4 Микрометр

Микрометр для наружных измерений (рисунок 2.5) состоит из скобы 1, соединенной с держателем 2, внутри которого проходит микрометрический винт 3. На микрометрическом винте закреплен полый цилиндр (барабан) 4 с делениями на конической поверхности. При вращении микрометрического винта барабан перемещается в осевом направлении относительно держателя 2, на котором нанесены миллиметровые деления. Напротив микрометрического винта 3, на скобе, имеется упор 5.

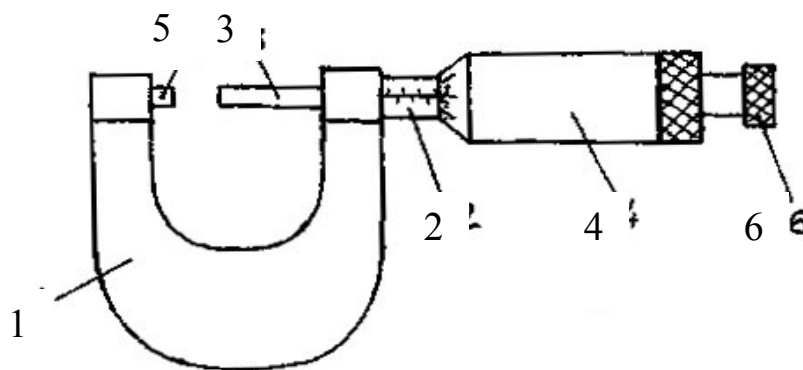


Рисунок 2.5 – Микрометр для наружных измерений

При измерении предмет зажимается между упором 5 и микрометрическим винтом 3. Главным источником ошибок при работе с точными измерительными приборами является различная сила давления, действующая со стороны измеряющей плоскости прибора на предмет. Это наиболее сильно сказывается при измерении микрометром. Во-первых, винт с малым ходом создает больше давления на предмет даже при незначительном усилии при вращении винта. Во-вторых, небольшие деформации предмета уже становятся заметны. Для устранения этих недостатков микрометр снабжен специальным приспособлением – трещоткой 6, создающей определенное и всегда одинаковое давление при измерении. При проверке установки нуля на микрометре, а также при измерении необходимо вращать микрометрический винт, только держась за трещотку. В противном случае измерения будут неверны.

У микрометра обычно ход винта равен 0,5 мм, а на барабане имеется 50 делений, что вызывает некоторое неудобство при отсчете. Шкала на неподвижном держателе 2 представляет собой двойной ряд делений, иначе деления необходимо было бы наносить очень густо (через 0,5 мм). Поэтому деления, обозначающие целые числа миллиметров, нанесены снизу от нулевой черты, а обозначающие 0,5; 1,5; 2,5 мм и т.д. – сверху от черты. Цена деления на вращающемся барабане равна 0,01 мм. При полном обороте барабан, а вместе с ним и стержень, перемещается на 0,5 мм, при двух оборотах – на 1 мм.

Отсчет при измерении производят следующим образом. По неподвижной шкале определяют размер тела с точностью до 0,5 мм. Сотые доли миллиметра определяют по круговой шкале барабана. Число сотых долей соответствует делению, расположенному против нулевой черты на неподвижном держателе. При полностью вкрученном микрометрическом винте до упора 5 против нулевой черты должен стоять нуль, в противном случае показания микрометра будут неверными.

Пример. На неподвижной шкале видно два деления, расположенных ниже черты, на барабане против черты стоит число 35 (рисунок 2.6).

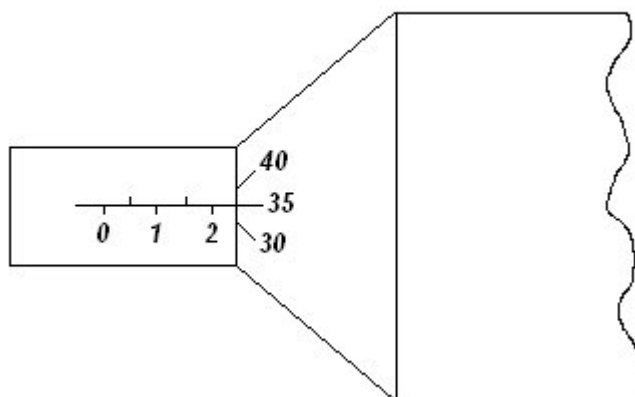


Рисунок 2.6 – Показание микрометра 2,35 мм

Размер детали равен 2,35 мм.

Пример. На неподвижной шкале видно два деления, расположенных ниже черты, и следующее за ними деление выше черты (рисунок 2.7).

На барабане против черты также стоит деление 35. В этом случае размер детали на 0,5 мм больше (помним, ход винта 0,5 мм), он будет равен $2\text{ мм} + 0,5\text{ мм} + 0,35\text{ мм} = 2,85\text{ мм}$. Таким образом, необходимо внимательно следить за тем, какое последнее деление, обозначающее целое число миллиметров или половины миллиметров, стоит перед барабаном.

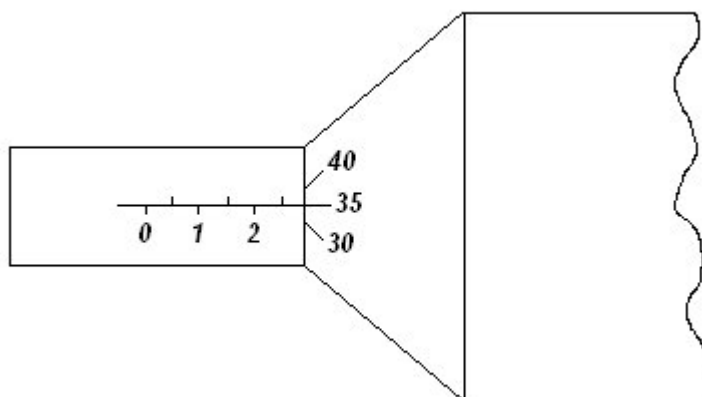


Рисунок 2.7 – Показание микрометра 2,85 мм

2.3.5 Весы

Для определения массы в лабораторной практике используются технические и аналитические весы. При помощи технических весов определяют массу тела с точностью ± 10 мг, аналитические весы позволяют определить массу с точностью $\pm (0,1 \dots 1,0)$ мг.

Главной частью любых весов является коромысло с призмой посередине (рисунок 2.8), которая опирается на горизонтальную площадку.

За изменением положения коромысла следят по стрелке или по освещенной шкале (на аналитических весах).

Чтобы предохранить призму коромысла от износа и поломки от случайных толчков, весы снабжены "арретиром". В нерабочем состоянии коромысло с призмой приподнимается над горизонтальной площадкой, на которую призма опирается. Арретирование весов достигается поворотом ручки, находящейся в центре столика весов.

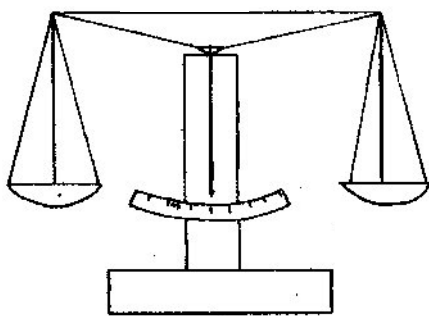


Рисунок 2.8 – Весы

Аналитические весы имеют ряд дополнительных приспособлений:

1. Для защиты от загрязнения и от воздушных потоков весы помещают в застекленный ящик с выдвигающимися стеклами.

2. Большинство аналитических весов снабжены воздушным демпфером (успокоителем). Воздушный демпфер состоит из двух пар легких металлических стаканов, вложенных один в другой, из

которых два укреплены неподвижно на колонке весов, два других подвешены к коромыслу. При движении коромысла стаканы перемещаются друг в друга и сжимают или разрезают газ во внутренней полости. Это создает дополнительное торможение, и время качания коромысла значительно уменьшается.

3. Взвешивание на таких весах до некоторой степени автоматизировано. На чашке весов помещают лишь крупные разновесы (1 г и выше), а десятки и сотни миллиграммов устанавливаются поворотом ручки специального приспособления, состоящего из двух ручек-лимбов, расположенных справа сверху корпуса весов.

При вращении малого лимба происходит наложение на рычаг коромысла или снятие десятков миллиграммов, при вращении второго лимба (большого) – сотен миллиграммов. Вращение лимбов осуществляется независимо друг от друга.

4. Единицы миллиграммов и их десятые доли отсчитываются по освещенной шкале.

5. Вблизи ручки арретира находится ручка для установки нуля при незагруженных весах.

2.3.6 Техника безопасности и правила обращения с весами

При работе с весами необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не взвешивать на весах слишком тяжелый груз. Предельно допустимая нагрузка указывается на весах.

2. Помещать на чашки и снимать взвешиваемое тело и разновесы, открывать и закрывать дверцы только при арретированных весах.

3. Арретирование весов и освобождение от арретира нужно производить плавно, без толчков.

4. До окончательного подбора разновесов не освобождать арретир полностью. При грубом несоответствии веса гирь весу груза неуравновешенность весов обнаруживается уже в самом начале опускания арретира.

5. Взвешиваемое тело кладется на левую чашку весов, разновесы следует помещать на

правую чашку последовательно, начиная с больших. Начальный груз разнovesа прикидывается на глаз.

6. Взвешиваемое тело и разновесы располагать по возможности ближе к середине чашки весов, чтобы не смещать общий центр тяжести.

7. Разновесы брать только пинцетом, а мелкие разновесы плоской формы (доли грамма) брать пинцетом за загнутые уголки.

8. Все наблюдения производить при закрытых дверцах защитного ящика.

9. Не следует оставлять надолго грузы и разновесы на чашках, в особенности, когда весы не арретированы.

10. После окончания работы нужно немедленно арретировать и разгрузить весы.

11. Ни в коем случае не оставлять неарретированными весы под нагрузкой.

2.3.7 Определение плотности вещества

Плотностью вещества ρ называется физическая величина, численно равная массе вещества, заключенного в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

где m и V – соответственно масса и объем тела.

Обычно в лабораторной работе исследуются тела правильной геометрической формы (параллелепипед, цилиндр, шар и т.д.), поэтому объем тела легко найти, определив его линейные размеры. Линейные размеры определяются штангенциркулем или микрометром. Микрометром определяют размеры, не превышающие 10 – 15 мм, в остальных случаях вполне достаточной точности можно достигнуть, используя штангенциркуль.

Для определения массы тела используются весы технические или аналитические. На аналитических весах взвешивают тела массой не более 5 – 7 г. В остальных случаях достаточно точности технических весов.

Для того чтобы ускорить взвешивание на аналитических весах, удобнее предварительно определить массу тела на технических хотя бы с точностью до 0,1 г.

2.4 Задание и порядок выполнения работы

Для определения плотности вещества студенту предоставляют одно тело достаточно простой формы.

1. Ознакомившись с устройством штангенциркуля и микрометра, определить цену деления и проверить правильность установки нуля.

2. Измерить линейные размеры тела. Измерение каждого параметра (длины, высоты, диаметра и т.д.) провести 6 – 7 раз на различных участках тела.

3. Записать все измерения в таблицу.

4. Ознакомившись с весами техническими и аналитическими, определить массу тела.

Удобнее сначала определить массу на технических весах и если она будет более 5 – 7 г, то измерения на этом можно закончить. Так как точность измерения массы на порядок выше измерения линейных размеров, взвешивание достаточно провести один раз, а за ошибку измерения принимать точность прибора.

Если же масса тела меньше 5 – 7 г, нужно еще раз взвесить тело на аналитических весах, так как точность технических весов в таком случае недостаточна.

5. Определить средние значения всех величин (для массы это не делают, так как она определялась один раз).

6. Вычислить ошибку каждого измерения и средние арифметические ошибки.

7. Вывести формулу для вычисления плотности вещества данного тела.

8. Подставляя в формулу средние значения, взятые в одной системе единиц (СГС или СИ), определить численное значение плотности вещества.

9. Используя формулу для вычисления плотности, вывести формулу относительной ошибки косвенного измерения.

10. За абсолютную ошибку прямого измерения принимать среднюю арифметическую, если она больше приборной, но если она меньше приборной, то за абсолютную ошибку измерения принять ошибку прибора.

За ошибку прибора для микрометра и штангенциркуля принять и цену деления, т.е. 0,01 мм и 0,1 мм соответственно, для технических весов – масса наименьшего равновеса – 10 мг, аналитических – 1 мг.

11. По найденной относительной ошибке определить абсолютную ошибку.

12. Записать ответ в виде:

$$r \pm Dr = \dots \quad \text{и его точность} \quad e = \frac{D r}{r} \times 100 \% .$$

2.5 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Перечень приборов и принадлежностей.
4. Описание экспериментальной методики.
5. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
6. Определение погрешности измерения.
7. Выводы.
8. Ответ.

2.6 Контрольные вопросы

1. Как определить цену деления нониуса?
2. Чему равна ошибка нониуса?
3. Как определить цену деления микрометра?
4. Чему равна ошибка микрометрического винта?
5. Для чего служит трещотка микрометра?
6. С какой точностью можно взвешивать на технических и аналитических весах?
7. Каким образом уменьшают время колебаний аналитических весов?
8. Для какой цели служит арретир?
9. Почему аналитические весы находятся в стеклянном корпусе?
10. Что такое абсолютная и относительная ошибка?
11. Как определить относительную ошибку косвенного измерения?
12. Каковы правила и порядок взвешивания на аналитических весах?
13. Как записать ответ (доверительный интервал) при завершении опыта?
14. Может ли быть ошибка эксперимента меньше той, которую допускают приборы?

2.7 Пример

отчета по лабораторной работе

"Определение плотности вещества твердого тела"

Цель работы: изучить устройство и получить практические навыки работы с простейшими приборами и инструментами для измерения массы тел и их линейных размеров; научиться

определять погрешности прямых и косвенных измерений.

1. Оборудование и материалы

1. Микрометр.
 2. Штангенциркуль.
 3. Весы технические.
 4. Весы аналитические.
 5. Твердое тело для определения плотности его вещества.
- ### 2. Описание экспериментальной методики

Плотностью ρ вещества называется физическая величина, численно равная массе вещества, заключенного в единице объема

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

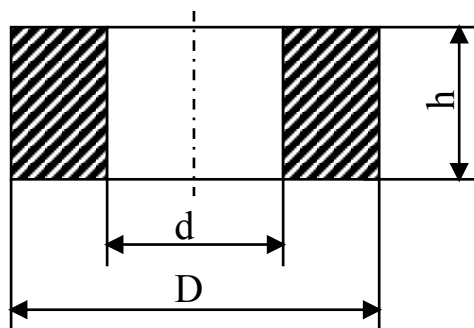
где m – масса тела,

V – объем тела.

Для тела правильной формы объем определяется путем измерения его линейных размеров. Размеры тела до 10 – 15 мм измеряются микрометром, а остальные – штангенциркулем.

Масса тела в пределах до 5 – 7 г измеряется на аналитических весах, а свыше – на технических весах. Для ускорения взвешивания на аналитических весах необходимо предварительно оценить массу тела на технических весах с точностью до 0,1 г.

3. Порядок проведения работы



Требуется определить плотность вещества тела в виде полого цилиндра. Эскизное изображение тела представлено на рисунке.

3.1 Изучаем устройство штангенциркуля и микрометра, определяем цену деления шкал инструментов, проверяем правильность установки нуля.

3.2 На различных участках тела 6 – 7 раз измеряем высоту h тела с помощью микрометра. Результаты измерений заносим в таблицу.

3.3 6 – 7 раз измеряем штангенциркулем наружный D и внутренний d диаметры тела. Результаты измерений заносим в таблицу.

3.4 Изучаем устройство технических и аналитических весов.

3.5 На технических весах измеряем массу тела $m = 63,370$ г. Измерение массы тела производим 1 раз, т.к. точность измерения массы на порядок выше точности измерения линейных размеров. За ошибку измерения массы принимаем точность технических весов (10 мг – минимальная масса разновеса): $\Delta m = 0,01$ г.

3.6 Определяем средние значения линейных размеров тела:

$$h_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i = \frac{5,37 + 5,39 + 5,35 + 5,40 + 5,35 + 5,38}{6} = 5,37 \text{ мм},$$

$$D_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{50,5 + 50,5 + 50,6 + 50,5 + 50,6 + 50,5}{6} = 50,5 \text{ мм},$$

$$d_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ii} = \frac{25,1 + 25,2 + 25,2 + 25,1 + 25,2 + 25,2}{6} = 25,16 \approx 25,2 \text{ мм}.$$

Численное значение h_{cp} округлено до сотых долей мм (точность измерения микрометром

равна 0,01 мм), а D_{cp} и d_{cp} – до десятых долей мм (точность измерений штангенциркулем равна 0,1 мм).

Результат вычислений заносим в таблицу.

3.7 Определяем абсолютные ошибки измерений

$$\Delta h_i = |h_{cp} - h_i|, i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\Delta D_i = |D_{cp} - D_i|, i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\Delta d_i = |d_{cp} - d_i|, i = 1, 2, \dots, n.$$

Результаты этих элементарных вычислений заносим сразу в таблицу.

3.8 Определяем средние значения абсолютных ошибок измерений.

$$\Delta h_{\bar{\delta}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i = \frac{0 + 0,02 + 0,02 + 0,03 + 0,02 + 0,01}{6} = 0,017 \approx 0,02 \text{ мм},$$

$$\Delta D_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{0 + 0 + 0,1 + 0 + 0,1 + 0}{6} = 0,033 \approx 0,0,$$

$$\Delta d_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{0,1 + 0 + 0 + 0,01 + 0 + 0}{6} = 0,033 \approx 0,0.$$

Результаты вычислений заносим в таблицу.

№ изм	h , мм	Δh , мм	D , мм	ΔD , мм	d , мм	Δd , мм
1	2	3	4	5	6	7
1	5,37	0	50,5	0	25,1	0,1
2	5,39	0,02	50,5	0	25,2	0
3	5,35	0,02	50,6	0,1	25,2	0
4	5,40	0,03	50,5	0	25,1	0,1
5	5,35	0,02	50,6	0,1	25,2	0
6	5,38	0,01	50,5	0	25,2	0
Среднее значение	5,37	0,02	50,5	0	25,2	0

3.9 Выводим формулу для вычисления плотности вещества тела.

Объем полого цилиндра равен

$$V = \frac{\pi h}{4} (D^2 - d^2). \quad (2.2)$$

Тогда формула для вычисления плотности приобретает вид

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi h (D^2 - d^2)}. \quad (2.3)$$

3.10 Определяем численное значение плотности вещества по формуле (2.3), где вместо h , D и d подставляем их средние значения в системе единиц измерения СИ

$$\rho = \frac{4 \times 63,37 \times 10^{-3}}{\pi \times 5,37 \times 10^{-3} [(50,5 \times 10^{-3})^2 - (25,2 \times 10^{-3})^2]} = 7,83 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 7,83 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

4. Определение погрешности измерения

4.1 Выводим формулу относительной ошибки косвенного измерения плотности вещества.

В формуле (2.3) представим $(D^2 - d^2) = (D + d) \times (D - d)$.

Логарифмируем обе части равенства (2.3)

$$\ln p = \ln 4 + \ln m - \ln p - \ln h - \ln(D + d) - \ln(D - d).$$

Обе части последнего равенства дифференцируем

$$\frac{d(r)}{r} = \frac{d(m)}{m} - \frac{d(h)}{h} - \frac{d(D) + d(d)}{D + d} - \frac{d(D) - d(d)}{D - d}. \quad (2.4)$$

Заменяем оператор дифференциала d на оператор конечного приращения Δ , а в числителях дробей – знаки "минус" на "плюс". Тогда формула относительной ошибки приобретает вид

$$e = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta D + \Delta d}{D + d} + \frac{\Delta D + \Delta d}{D - d}.$$

4.2 Определяем, какие абсолютные ошибки измеренных величин необходимо подставить в формулу (2.4). Масса тела измеряется 1 раз, поэтому в качестве абсолютной ошибки Δm применяем величину приборной ошибки: $\Delta m = 0,01$ г.

Высота h измерялась микрометром с точностью до 0,01 мм, а после обработки результатов прямых измерений получили $\Delta h_{\text{ср}} = 0,02$ мм. Поэтому принимаем большее значение $\Delta h = \Delta h_{\text{ср}} = 0,02$ мм.

Диаметры D и d измерялись штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, а после обработки результатов измерений получили $\Delta D_{\text{ср}} = 0$, $\Delta d_{\text{ср}} = 0$. В качестве абсолютных ошибок ΔD и Δd принимаем приборную ошибку:

$$\Delta D = \Delta d = 0,1 \text{ мм.}$$

4.3 По формуле (2.4) определяем относительную погрешность

$$e = \frac{0,01}{63,37} + \frac{0,02}{5,37} + \frac{0,1 + 0,1}{50,5 + 25,2} + \frac{0,1 + 0,1}{50,5 - 25,2} = 0,00016 + 0,0037 + 0,0026 + 0,0079 \approx 0,014.$$

В процентах это составляет 1,4 %.

4.4 Определяем абсолютную погрешность косвенного измерения плотности вещества

$$\Delta r = r_{\text{ср}} \times e = 7,83 \times 0,014 = 0,1112 \approx 0,11 \text{ г/см}^3.$$

Численное значение $\Delta \rho$ округляем до второго знака после запятой, как и значение плотности ρ .

5. Выводы

Сравнивая полученный результат плотности вещества твердого тела со справочными данными, делаем вывод, что данное твердое тело изготовлено из стали.

Ответ: $r = r_{\text{ср}} \pm \Delta r = (7,83 \pm 0,11)_{\text{г/см}^3},$

точность результата $\frac{\Delta r}{r} \times 100 \% = 1,4 \%$.

Подпись студента.....

Дата.....

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ»

Цель работы: Измерение зависимости мгновенной скорости от пройденного расстояния.

1.1 Приборы и материалы

1. Лабораторная установка «Равноускоренное движение»

2. Цифровой секундомер

3. Набор гирь

1.2 Теоретическое введение

На движущуюся тележку действует сила тяжести, сила реакции опоры, сила трения качения, и сила сопротивления воздуха. В случае малых скоростей, когда силой сопротивления воздуха можно пренебречь, это движение является равноускоренным без начальной скорости. Следовательно, его можно описать законом:

$$S = \frac{at^2}{2} \quad (1.1)$$

где S – путь, a – ускорение, t – время.

Для проверки этого закона можно использовать следующий метод. Так как движение тележки равноускоренное, то при любых S , при прочих равных условиях, ускорение будет неизменным, т.е.

$$\frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2} = \dots = const \quad (1.2)$$

Если это так, значит закон справедлив. Таким образом, задача эксперимента состоит в измерении t для соответствующих S и проверки условия 1.2.

Однако ряд причин случайного характера (например, неточность начального расположения тележки, инерционность при пуске, застойные явления в подшипниках оси блока и т.п.) усложняют эту зависимость.

Введем параметр τ – случайную величину, характеризующую неопределенность моментов начала и конца движения. Тогда,

$$S(t, \tau) = \frac{a(t+\tau)^2}{2} \quad (1.3)$$

Преобразовав это выражение, получим:

$$S(t, \tau) = \frac{a\tau^2}{2} + at\tau + \frac{at^2}{2} \quad (1.4)$$

Если распределение случайной величины τ симметрично относительно значения $\bar{\tau}$ (то есть положительные и отрицательные значения τ равновероятны), то $\bar{\tau} = 0$, $\bar{\tau}^2 \neq 0$, следовательно, введя обозначения $B \equiv \frac{a}{2}$ и $S_0 \equiv \frac{a\bar{\tau}^2}{2}$, можно записать:

$$S(t) = S_0 + Bt^2 \quad (1.5)$$

Этот закон содержит два параметра: S_0 – начальное смещение и B – величину, равную половине ускорения. Эти параметры определяются по измеренным значениям пройденного пути S_i и сериям значений промежутков времени $t_{i,j}$ методом наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов

Пусть в результате эксперимента мы получили ряд измерений величины $y : y_1, y_2, \dots, y_n$ соответствующих значениям аргумента $t_1, t_2, \dots, t_n$, которые могут быть представлены на графике в виде точек (рисунок 1.1). Нам необходимо установить эмпирическую зависимость между y и t .

Очевидно, если соединить последовательно эти точки, то получим ломаную линию, не имеющую ничего общего с искомой зависимостью $y = f(t)$. Это следует хотя бы из того, что форма этой ломаной линии не будет воспроизводиться при повторных сериях измерений.

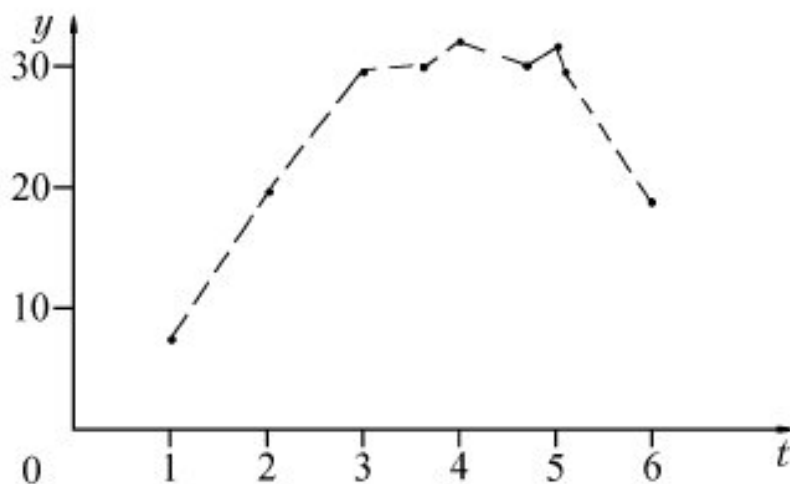


Рисунок 1.1

Измеренные значения y_i будут в общем случае смещены относительно искомой кривой как в сторону больших, так и в сторону меньших значений, вследствие статистического разброса (рисунок 1.2).

Задача состоит в том, чтобы по данным экспериментальным точкам найти гладкую кривую (или прямую), которая проходила бы как можно ближе к графику “истинной” функциональной зависимости $y = f(t)$.

Теория вероятностей показывает, что наилучшим приближением будет такая кривая (или прямая) линия, для которой сумма квадратов расстояний по вертикали от экспериментальных точек до этой кривой будет минимальной.

Этот метод нахождения эмпирической зависимости получил название *метода наименьших квадратов*. Сущность этого метода состоит в следующем.

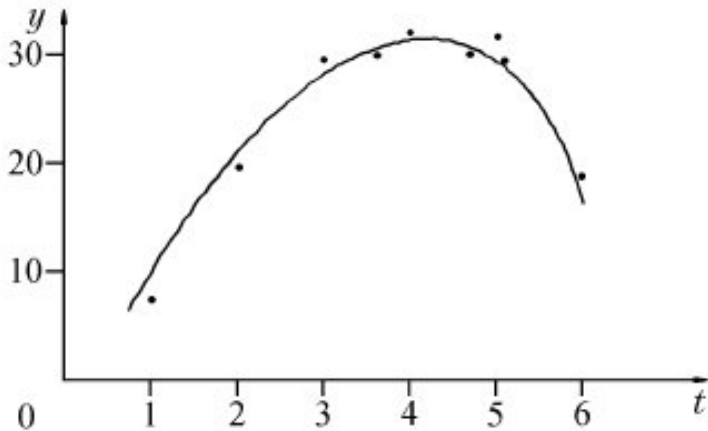


Рисунок 1.2

Предположим, что искомая зависимость выражается функцией $y = f(t, A_1, A_2, \dots, A_m)$, где $A_1, A_2, \dots, A_m$ – параметры. Значения этих параметров определяются так, чтобы точки y_i располагались по обе стороны этой кривой, как можно ближе к последней, то есть, чтобы сумма квадратов отклонений измеренных значений y_i от функции $y = f(t)$ была наименьшей. (Это соответствует предположению, что разброс точек относительно кривой $y = f(t)$ подчиняется закону нормального распределения.)

Мерой этого разброса является дисперсия σ^2 или ее приближенное выражение $(\Delta S_n)^2$ – средний квадрат отклонений:

$$(\Delta S_n)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - y(t_i)]^2 \quad (1.6)$$

Этот средний квадрат отклонений и должен принять минимальное значение. Как известно, функция $f(A)$ принимает минимальное значение при $A = A_{min}$, если ее первая производная равна нулю, а вторая производная положительна при значении $A = A_{min}$. Для функции многих переменных эти условия заменяются требованием, чтобы частные производные, то есть производные по параметру A_i удовлетворяли вышеупомянутым условиям (при этом остальные параметры $A_k (k \neq i)$ при вычислении производных считаются постоянными).

Таким образом, из условий минимума мы получаем систему уравнений для определения наилучших значений параметров. Рассмотрим применение метода наименьших квадратов на примере отыскания эмпирической зависимости пути, проходимого тележкой по направляющей, от времени.

Полагая, что “истинная” зависимость пути от времени имеет вид

$$S(t) - S_0 = Bt^2 \quad (1.7)$$

можно рассмотреть случайные отклонения:

$$(\Delta \bar{S})_i = S_i - S(t_i) \quad (1.8)$$

где S_i – измеренные положения тележки в моменты времени t_i .

Запишем квадратичную форму

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2)^2 \quad (1.9)$$

и потребуем, чтобы эта квадратичная форма, описывающая сумму квадратов отклонений точек S_i от искомой кривой, была минимальной:

$$F(S_0, B) = \min \quad (1.10)$$

Тогда из равенства нулю частных производных от F по параметрам S_0 и B получим два уравнения

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial S_0} = -2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial B} = -2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_0 - Bt_i^2) \cdot t_i^2 = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

Эти уравнения можно переписать в виде

$$nS_0 + B \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^2 = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1.12)$$

$$S_0 \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^2 + B \sum_{i=1}^n \bar{t}_i^4 = \sum_{i=1}^n S_i \bar{t}_i^2 \quad (1.13)$$

Решение этой системы позволяет найти значения S_0 и $B \equiv \frac{a}{2}$, а затем определить ускорение a .

(В уравнениях 1.11 – 1.14 индекс i соответствует усредненному значению данного параметра соответствующей серии измерений в таблицах 1.1 и 1.2)

1.3 Описание экспериментальной установки

Схема учебно–лабораторного оборудования «Равноускоренное движение» представлена на рисунке 1.3.

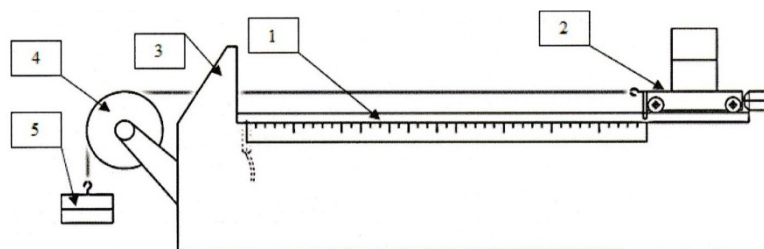


Рисунок 1.3 – Конструкция изделия

Оборудование конструктивно представляет собой, горизонтально расположенную направляющую (1), по которой, в прямолинейном направлении, может катиться тележка (2). С одной стороны дорожка оснащена упором (3) для остановки тележки и вращающимся блоком (4). Через блок перекинута легкая капроновая нить, одним концом соединенная с тележкой, а другим, со свободно подвешенным цилиндрическим грузом (5). В исходном положении тележку удерживает электромагнит, отпускающий тележку по запуску секундомера. При освобождении тележки, груз приходит в движение, придавая ей поступательное, равноускоренное движение. На самой тележке так же предусмотрена возможность установки грузов для изменения ее массы и следовательно характера ускорения при проведении опытов.

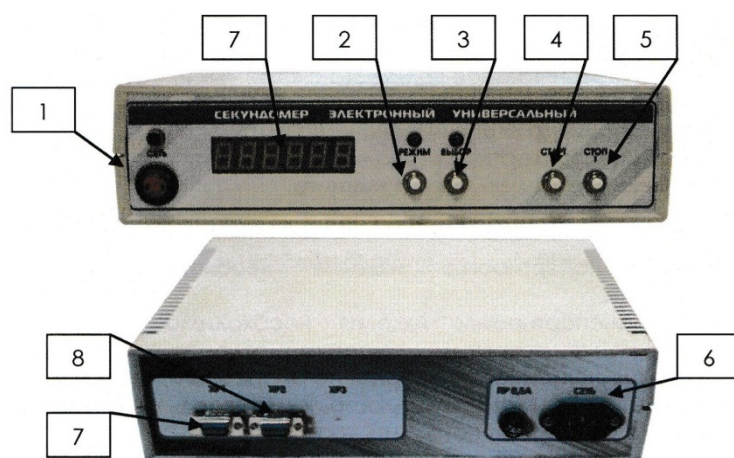


Рисунок 1.4 – Панель управления цифрового секундомера

Оборудование «Цифровой секундомер» предназначено для измерения интервалов времени и позволяет определять значения до тысячных секунд. Времязадающим устройством секундомера является кварцевый генератор. Сигнал стабилизированной частоты с кварцевого генератора поступает на вход микроконтроллера, обеспечивающего следующие функции: приём командных сигналов от кнопочных переключателей и внешних датчиков; обработку сигналов в программе, в соответствии с установленным режимом работы, и выдачу результатов обработки на устройства цифровой индикации и светодиоды. Требуемый режим работы задаётся нажатием соответствующей кнопки выбора режима. После нажатия кнопки (1), происходит включение прибора и загорается электронный дисплей (7) на котором отображаются значения измерений при работе.

Кнопка «РЕЖИМ», позволяет выбрать нужный режим, для получения нужных временных значений.

Кнопка «ВЫБОР» подтверждает выбранный ранее режим.

Кнопка «СТОП», нажатием кнопки «СТОП» осуществляется включение магнита (если он используется в установках, где есть магнит)

Кнопка «СТАРТ», при нажатии кнопки происходит счет импульсов, после формирования 6-ти импульсов, счет импульсов останавливается.

Режим "Г" данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Секундомер работает в пяти режимах:

Режим "1" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Максимальное количество импульсов: 6. Нажимая кнопку «ВЫБОР» можно просмотреть время до каждого из импульсов.

Режим "2" – данный режим позволяет определить интервал между данным и последующим импульсом. При нажатии кнопки «ВЫБОР» можно просмотреть время между интересующими нас импульсами. Максимальное количество считаемых импульсов: 6.

Режим "3" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до 1-го сформированного импульса.

Режим "4" – стандартный режим секундомера.

Режим "5" – режим включения магнита.

1.4 Порядок проведения работы

1. Замерьте расстояния вдоль направляющей между вертикальной металлической шпилькой тележки, установленной в начальное положение и датчиками Д1; Д2; Д3; Д4; Д5; Д6.
2. Полученными значениями в таблице 1.1 заполните графы – Пройденное расстояние S_i .
3. Установите на тележку груз массой 1000 грамм.
4. Закрепите на свободный конец капроновой нити груз массой 50 грамм.
5. Включите электронный секундомер, убедитесь, что секундомер работает в 1-м режиме (цифра на крайнем правом индикаторе), если нет – нажимая кнопку «Режим» выберите 1 режим работы.
6. Придерживая правой рукой груз, закрепленный на нити, переместите тележку по направляющей в крайнее левое положение до упора и нажмите кнопку «Стоп» для включения электромагнита.
7. Нажмите кнопку «Старт», электромагнит выключится, после чего грузик и тележка начнут двигаться, одновременно запустится секундомер, а на табло мелькать цифры – отсчет времени.

8. После прохождения тележкой всего пути до упора в конце направляющей – секундомер остановит отсчет автоматически.

9. В таблицу 1.1 для значения пути $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ занесите значение промежутка времени $t_{1,i}$ в секундах. После останова секундомера на табло будет отображаться значение времени для S_1 , последовательно нажимая кнопку «Выбор», запишите значения для $S_2 - S_6$.

10. Затем проведите измерения еще четыре раза, повторяя пункты 6 – 9 и вписывая в таблицу 1.1 значения $t_{2,i}, t_{1,3}, t_{4,i}, t_{6,i}$.

Таблица 1.1

№ п/п	Пройденное расстояние $S_{i,m}$	ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ						Среднее значение $\bar{t}_i, c$
		$t_{1,i}, c$	$t_{2,i}, c$	$t_{3,i}, c$	$t_{4,i}, c$	$t_{5,i}, c$	$t_{6,i}, c$	
1								
2								
3								
4								
5								

11. После выполнения измерений выключить секундомер.

Обработка результатов измерений

В каждой серии измерений промежутков времени найдите среднее значение $\bar{t}_i$ с двумя цифрами после запятой. Данные запишите в таблицу 1.1.

Для нахождения параметров S_0 и B методом наименьших квадратов следует внести в таблицу 1.2 следующие данные, предварительно рассчитав недостающие:

$$S_i, \bar{t}_i, \bar{t}_i^2, \bar{t}_i^4, S_i \bar{t}_i^2$$

(Здесь i – номер серии измерения)

Подсчитайте суммы по всем сериям измерений указанных данных (i изменяется от 1 до 5): $\sum S_i, \sum_{i=1}^5 S_i$,

$\sum \bar{t}_i, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i, \sum \bar{t}_i^2, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2, \sum \bar{t}_i^4, \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^4$ и $\sum S_i \bar{t}_i^2, \sum_{i=1}^5 S_i \bar{t}_i^2$ и так же внести в таблицу 1.2.

Решите систему уравнений 1.14 относительно параметров S_0 и B используя числа, взятые из последней строчки таблицы:

$$\begin{cases} 5S_0 + B \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2 = \sum_{i=1}^5 S_i \\ S_0 \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^2 + B \sum_{i=1}^5 \bar{t}_i^4 = \sum_{i=1}^5 S_i \bar{t}_i^2 \end{cases} \quad (1.14)$$

Таблица 1.2

i	S_i	$\bar{t}_i$	$\bar{t}_i^2$	$\bar{t}_i^4$	$S_i \bar{t}_i^2$
1					

2					
3					
4					
5					
$\sum_{i=1}^5$					

Определите значения S_0 и B , необходимо на миллиметровой бумаге построить график зависимости пути от времени ($S(t) = S_0 + Bt^2$ в виде сплошной линии. Затем на этом же графике отметить значения $\overline{t_i}$ и S_i в виде отдельных точек.

Рассчитайте погрешность измерений по общим правилам

1.5 Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

1.6 Контрольные вопросы

1. Какие величины характеризуют прямолинейное движение?
2. Какое движение называется равномерным, ускоренным?
3. В чем состоит принцип метода наименьших квадратов?
4. Начертите график зависимости пути от времени для равноускоренного движения без начальной скорости, с начальной скоростью; график пути для равнозамедленного движения.
5. Объясните смысл и происхождение слагаемого S_0 и величины B в законе пути, полученном в результате работы.
6. С какой целью применяется метод наименьших квадратов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ С РАВНОМЕРНЫМ УСКОРЕНИЕМ»

Цель и содержание работы:

Целью работы является изучение законов вращательного движения тела при равномерном угловом ускорении.

Содержание работы состоит в определении и зависимости углового ускорения от массы тела и массы ускоряющего груза.

2.1 Приборы и материалы

1. Установка «Крутильный маятник Поля»
2. Цифровой секундомер

2.2 Краткие теоретические сведения

В настоящей работе определяется зависимость углового перемещения от времени для равноускоренного движения при помощи учебного стенда «Вращательное движение с равномерным ускорением», схема которого представлена на рисунке 2.3. Движение шкива можно принять равноускоренным, если считать, что момент силы трения постоянен ($M_{тр} = \text{const}$) и что нить нерастяжима и не проскальзывает по шкиву. Используя известную формулу для координаты тела при равноускоренном движении с нулевой начальной скоростью:

$$x = a \frac{t^2}{2} \quad (2.1)$$

с учетом соотношения $a = \varepsilon \frac{D}{2}$ – получаем формулу для косвенного измерения углового ускорения при полном обороте:

$$\varepsilon = \frac{2 \times 2\pi}{t^2} \quad (2.2)$$

Зависимость углового ускорения шкива от массы m ускоряющего груза

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно фиксированной оси вращения в приближении невесомой нити имеет вид:

$$I_e = M_{рез} = T \frac{D}{2} - M_{тер} \quad (2.3)$$

Уравнение выписано в проекции на ось вращения; I – момент инерции шкива относительно неподвижной оси; ε – проекция углового ускорения шкива на ось вращения; $M_{рез}$ – проекция результирующего момента всех сил на ось вращения, складывающаяся из момента силы натяжения нити T и момента силы трения $M_{тр}$ тормозящего вращение шкива.

Силу натяжения нити T можно определить из второго закона Ньютона для массы m , его проекция на направление движения груза m имеет вид:

$$ma = mg - T \quad (2.4)$$

где a – ускорение движения массы m .

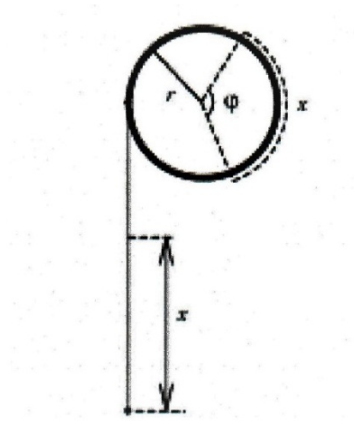


Рисунок 2.1 – Схема блока с натянутой капроновой нитью

В приближении нерастяжимой нити по рисунку 2.1 получаем соотношения, связывающие поступательное движение массы m с вращением шкива.

$$\frac{x}{r} = \varphi, V = \frac{dx}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} r = \omega r; a = \frac{ds}{dt} = \frac{d\omega}{dt} r = \varepsilon r = \varepsilon \frac{D}{2} \quad (2.5)$$

Здесь φ (рад) – угол поворота шкива радиусом r при опускании груза на расстояние x ; V и φ – соответствующие линейная и угловая скорости; D – диаметр шкива.

С учетом уравнений 2.4 и 2.5 из уравнения 2.3 находим угловое ускорение шкива:

$$\varepsilon = \frac{mg \frac{D}{2} - M_{\text{тр}}}{I + m \frac{D^2}{4}} \quad (2.6)$$

Очевидно, что при $M_{\text{тр}} = \text{const}$ (момент сил трения постоянен) вращение шкива является равноускоренным.

Из полученной формулы видно, что маятник будет вращаться с $\varepsilon > 0$ лишь при выполнении условия:

$$m > m_0 = \frac{2M_{\text{тр}}}{gD} \quad (2.7)$$

т. е. при массе груза m , достаточной для того чтобы был преодолен момент сил трения, препятствующий вращению шкива.

Формула 2.6 упрощается при выполнении неравенства

$$I \gg m \frac{D^2}{4} \quad (2.8)$$

зависимость углового ускорения ε от массы опускающегося груза при этом становится линейной:

$$\varepsilon = \frac{mgD}{2I} - \frac{M_{\text{тр}}}{I} \quad (2.9)$$

График зависимости $\varepsilon(m)$ при выполнении неравенства 2.8 приведён сплошной линией на рисунке 2.2. Штриховой линией показана точная зависимость 2.6. Штриховая горизонтальная прямая – асимптота при $m \rightarrow \infty$.

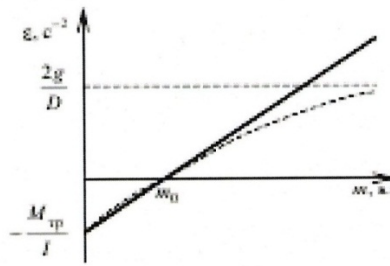


Рисунок 2.2 – График зависимости величин

Примечание. Если момент сил трения зависит от времени, то вращение маятника не будет равноускоренным. Возможен случай, когда момент сил трения пропорционален угловой скорости:

$$M_{\text{тр}} = M_0 + A\omega \quad (2.10)$$

где A – коэффициент пропорциональности;

$M_0 = m_0 g \frac{D}{2}$ – момент сил трения покоя при $\omega = 0$. Заметим, что при $m < m_0 \equiv \frac{M_0}{g \frac{D}{2}}$ (сравните с формулой 2.7) вращение шкива не происходит. Решая дифференциальное уравнение 2.6 с учетом выражения 2.10, можно показать, что угловое ускорение ε в момент времени t дается формулой:

$$\varepsilon = \frac{(m - m_0)gD}{2(I + m \frac{D^2}{4})} \cdot e^{-\frac{A}{I + m \frac{D^2}{4}} \cdot t} \quad (2.11)$$

Оценка стандартного отклонения s производится по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n}} \quad (2.12)$$

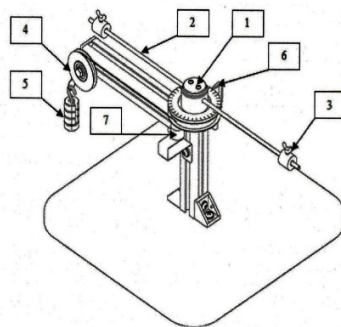


Рисунок 2.3 – Конструкция изделия:

1 – металлический шкив; 2 – стержень; 3 – регулируемые грузы; 4 – блок; 5 – цилиндрические грузы; 6 – датчик; 7 – электромагнит.

Схема лабораторной установки показана на рисунке 2.3. и конструктивно представляет собой, металлический шкив (1), горизонтально закрепленный на вертикальной опоре при помощи

подшипников вращения. К верхней плоскости шкива присоединен металлический маховик, меньшего диаметра, на котором радиально закреплены два симметричных стержня (2). На каждом из стержней расположен груз (3) при этом имеется возможность регулировки расстояния установки груза относительно центра вращения маховика. К вертикальной опоре, ниже шкива, горизонтально прикреплен металлическая рейка, на конце которой в вертикальной плоскости установлен блок (4), который свободно вращается в собственных подшипниках. Через блок перекинута тонкая капроновая нить. Нить намотана на основной шкив и закреплена на нем, а свободным концом привязана к подвесному цилиндрическому грузу (5). Металлический шкив (1) может быть удержан от вращения при помощи металлического флажка и электромагнита (7). Если не удерживать шкив, то под действием опускающегося груза, нить разматывается и приводит шкив в ускоренное вращение. Время периода вращения шкива измеряется электронным секундомером. Для этого на стенде установлен индукционный датчик (6), который фиксирует каждый оборот шкива в определенной точке и передает сигнал в секундомер. Длина нити подобрана так, что при полной ее размотке, шкив успевает сделать шесть полных оборотов вокруг оси вращения. Следовательно, при проведении опыта секундомер будет фиксировать шесть периодов вращения.

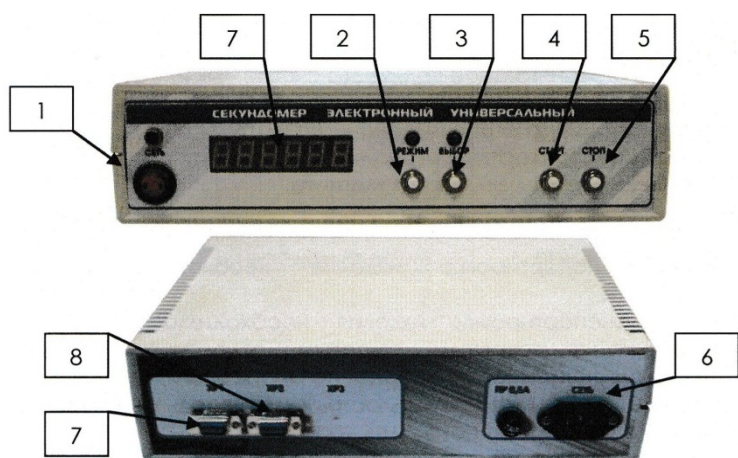


Рисунок 2.4 – Панель управления цифрового секундомера: 1 – кнопка включения прибора; 2 – кнопка «РЕЖИМ»; 3 – кнопка «ВЫБОР»; 4 – кнопка «СТАРТ»; 5 – кнопка «СТОП»; 6 – разъем для сетевого кабеля; 7 – дисплей(на первом рисунке) разъем X1 (на втором рисунке, магнит); 8 – разъем X2(датчик)

Оборудование «Цифровой секундомер» предназначено для измерения интервалов времени и позволяет определять значения до тысячных секунд. Вреязадающим устройством секундомера является кварцевый генератор. Сигнал стабилизированной частоты с кварцевого генератора поступает на вход микроконтроллера, обеспечивающего следующие функции: приём командных сигналов от кнопочных переключателей и внешних датчиков; обработку сигналов в программе, в соответствии с установленным режимом работы, и выдачу результатов обработки на устройства цифровой индикации и светодиоды. Требуемый режим работы задаётся нажатием соответствующей кнопки

выбора режима. После нажатия кнопки(1), происходит включение прибора и загорается электронный дисплей (7) на котором отображаются значения измерений при работе.

Кнопка «РЕЖИМ», позволяет выбрать нужный режим, для получения нужных временных значений.

Кнопка «ВЫБОР» подтверждает выбранный ранее режим.

Кнопка «СТОП», нажатием кнопки «СТОП» осуществляется включение магнита (если он используется в установках, где есть магнит)

Кнопка «СТАРТ», при нажатии кнопки происходит счет импульсов, после формирования 6-ти импульсов, счет импульсов останавливается.

Режим "Г" данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Секундомер работает в пяти режимах:

Режим "1" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до каждого сформировавшегося импульса. Максимальное количество импульсов: 6. Нажимая кнопку «ВЫБОР» можно просмотреть время до каждого из импульсов.

Режим "2" – данный режим позволяет определить интервал между данным и последующим импульсом.

При нажатии кнопки «ВЫБОР» можно просмотреть время между интересующими нас импульсами.

Максимальное количество считаемых импульсов: 6.

Режим "3" – данный режим позволяет определить время от начала отсчета до 1-го сформированного импульса.

Режим "4" – стандартный режим секундомера.

Режим "5" – режим включения магнита.

2.4 Порядок выполнения работы

1. Закрепить на свободном конце капроновой нити груз массой m .

2. Установите грузы на штангах шкива с расстоянием R от центра вращения. Расстояния R задаются преподавателем.

3. Включить электронный секундомер, убедиться, что секундомер работает в 1-ом режиме (цифра на крайнем правом индикаторе), если нет – нажимая кнопку «Режим» выбрать 1 режим работы.

4. Придерживая правой рукой груз, закрепленный на нити, намотать оставшуюся ее часть на шкив.

5. Вращая шкив рукой, установить металлический флажок прямо над электромагнитом.

6. Нажать кнопку «Стоп» на секундомере, убедившись, что шкив удерживается от проворачивания (следить, чтобы флажок не смещался относительно электромагнита), после этого нажать кнопку «Старт» на секундомере, электромагнит выключится.

7. Подвешенный груз начнет движение вниз, маховик начнет вращаться, а на табло начнется отсчет времени.

8. После прохождения грузиком всего пути – секундомер остановится автоматически.
9. После останова секундомера на табло будет отображаться значение времени периода вращения 1-го полуоборота T_1 , последовательно нажимая кнопку «Выбор», записать значения для $T_2 - T_6$.
10. Затем провести измерения еще два раза, повторяя пункты 3 – 9. Записать значения.
11. Заменить груз подвеса на другой, массой $m = \text{xxx}$. И провести опыт для этого груза повторяя пункты 3 – 10.
12. Вычислите значения ϵ для всех значений m и R предыдущих пунктов.
13. Вычислите оценки стандартных отклонений s для всех значений ϵ при обоих грузах m .
14. Постройте зависимость ϵ от m при двух значениях m на одном и том же графике с учетом оценок стандартных отклонений. По полученным графикам сделайте оценки момента сил трения и момента инерции.
15. Проверьте, используя оценку момента инерции I в пункте 14, выполнение неравенства $I \gg m \frac{D^2}{4}$, при котором справедлива линейная зависимость углового ускорения от массы m ускоряющего груза, для различных значений массы m из проведенных опытов.
16. Рассчитайте ошибку измерений по общим правилам

2.5 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

2.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы? Какие величины в работе измеряются непосредственно?
2. Как направлены векторы угловой скорости $\vec{\omega}$, углового ускорения $\vec{\epsilon}$, результирующего момента сил и момента сил трения в случае ускоренного вращения?
3. Как вы записываете уравнение динамики вращательного движения маятника в данной работе?
4. Какова модель нити? Как свойства идеальной нити влияют на вид кинематических и динамических уравнений?

5. Покажите на рисунке все силы, действующие на шкив. Почему в уравнении динамики вращательного движения 1.3 не учтены моменты некоторых из этих сил?
6. Перечислите все допущения, при которых получается линейная зависимость углового ускорения γ от массы m .
7. Выведите зависимость углового ускорения γ от массы m опускающегося груза m в приближении линейной зависимости $\gamma(m)$.
8. Как в данной работе рассчитать оценку стандартного отклонения величины γ ?
9. Подтверждается ли измерениями линейная теоретическая зависимость углового ускорения γ от массы ускоряющего груза m ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ПАРАЛЛЕЛОГРАММ СИЛ»

Цель работы: Определить точку равновесия в случае, когда силы F_1 и F_2 симметричны.

4.1 Приборы и материалы

1. Стенд «Параллелограмм сил»
2. Набор грузов

4.2 Краткие теоретические сведения

Силы – это векторы, и, следовательно, их можно складывать, используя правила сложения векторов. Чтобы представить сумму двух векторов графически, начало второго вектора помещается в точку конца первого вектора. Стрелка из точки начала первого вектора до точки конца второго вектора представляет собой вектор, полученный в результате сложения этих векторов. Если построить параллелограмм (в котором два складываемых вектора являются сторонами), диагональ, проведенная из угла начальной точки в противоположный угол, будет представлять собой результат сложения векторов (см. рисунок. 4.1).



Рисунок 4.1 – Векторная сумма сил (параллелограмм сил)

Векторное сложение сил можно просто и наглядно представить на столе для демонстрации сил. Точка приложения трех отдельных сил в состоянии равновесия находится строго по середине стола. Величины отдельных сил определяются по подвешенным грузикам, а угол каждого из векторов силы (направление действия каждой из сил) определяется с помощью транспортира. В состоянии равновесия сумма трех отдельных сил определяется выражением

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0 \quad (4.1)$$

Поэтому F_3 – это сумма отдельных сил F_1 и F_2 (см. рисунок. 4.2):

$$-F_3 = F = F_1 + F_2 \quad (4.2)$$

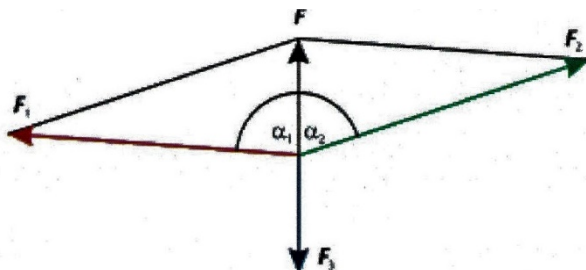


Рисунок 4.2 – Определение суммы векторов двух сил F_1 и F_2 по уравнивающей силе F_3 .

Параллельные векторные составляющие для суммы F определяются уравнением

$$-F_3 = F = F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 \quad (4.3)$$

Параллельные векторные составляющие для определяются уравнением

$$0 = F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 \quad (4.4)$$

Уравнения 4.3 и 4.4 представляют собой математический анализ векторного сложения. Для проведения данного опыта рекомендуется направить силу F_3 так, чтобы ее угол был равен 0° . В качестве альтернативы аналитическому представлению равновесия сил можно исследовать графически. Для того чтобы это сделать, нарисует линии, представляющие все три силы и исходящие из центральной точки приложения. Отметим величину и угол каждой силы. Затем сместим силы F_2 и F_3 вдоль параллельных линий, пока точка начала не окажется в конце предыдущего вектора. Полученный в результате вектор равен 0 (см. рисунок 4.3).

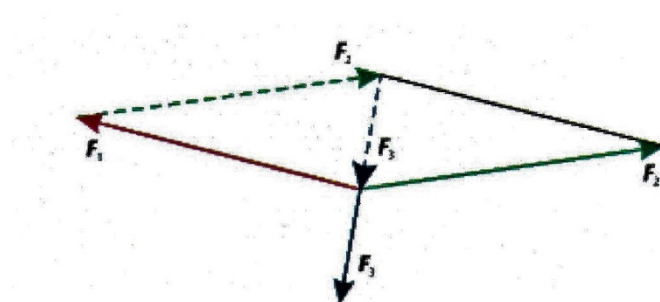


Рисунок 4.3 – Графическое исследование равновесия трех произвольных сил, действующих в различных направлениях

При проведении данного опыта эту операцию выполняют для трех произвольных сил, следя за тем, чтобы все время сохранялось состояние равновесия. В данном опыте аналитическое наблюдение ограничивается особым случаем, когда две силы F_1 и F_2 симметричны F_3 .

Оценочный расчёт

Векторное сложение сил можно просто и наглядно представить на столе для демонстрации сил. Точка приложения трех отдельных сил в состоянии равновесия находится строго по середине стола.

Величины отдельных сил определяются по подвешенным грузикам, а угол каждого из векторов силы (направление действия каждой из сил) определяется с помощью транспортира. Результат опыта можно оценить аналитически или представить графически.

Равенство 4.4 выполняется в симметричном случае ($F_1 = F_2$; $a_1 = -a_2$). Из уравнения 4.3 получаем уравнение характеристики, с помощью которого построен график на рисунке 4.4 (описывающий данные измерения).

$$F = 2F_1 \cos a_1 \quad (4.5)$$

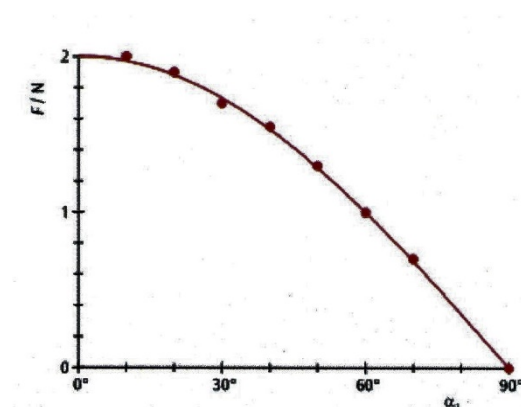


Рисунок 4.4 – Измеренная и рассчитанная суммы двух симметричных сил в зависимости от угла a_1

4.3 Описание и технические характеристики оборудования

Состав комплекта учебно–лабораторного оборудования «Параллелограмм сил» представлен на рисунке 4.5.

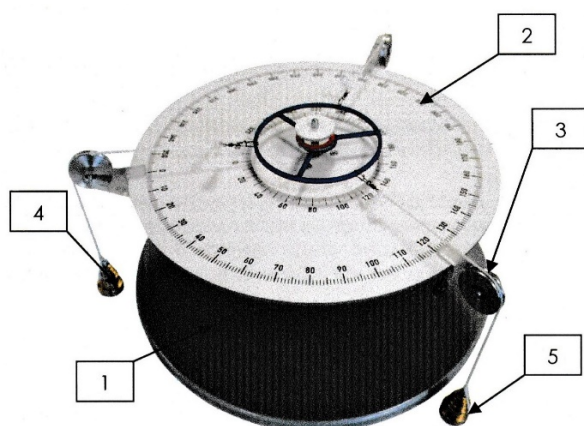


Рисунок 4.5 – Конструкция изделия: 1 – основание; 2 – стол с градуированной шкалой; 3 – съемные крепления; 4 – съемные подвесы; 5 – грузы;

Схема лабораторной установки показана на рисунке 4.5. К основанию с креплением для вертикальной стойки(1) прикреплена вертикальная стойка, на которую устанавливается стол с нанесенной градуированной шкалой(2), к которому прикреплены съёмные крепления для направления подвесов(3), к ним в свою очередь подсоединены съёмные подвесы(4) с разновесными грузами(5). Величины отдельных сил определяются по подвешенным грузикам(б), а угол каждого из векторов силы (направление действия каждой из сил) определяется с помощью транспортира.

4.4 Порядок выполнения работы

Определение силы равновесия

1. Установите основание (см. рисунок 4.4) горизонтально.
2. Установите заданный преподавателем угол между двумя грузами.
3. Нити с грузами перекиньте через блоки.
4. Установите на подвесы заданные грузы.
5. Выберите угол и рассчитайте необходимый вес груза.
6. Установите угол и грузы на подвесе.
7. Добейтесь равновесия грузов, перемещая третий блок.
8. Сравните практический результат с теоретическим.
9. Повторите эксперимент, изменив угол или вес грузов.
10. Рассчитайте погрешность измерений по общим правилам.

4.5 Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие основные разделы:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Описание экспериментальной методики.
4. Порядок проведения работы, таблицы результатов прямых и косвенных измерений.
5. Определение погрешности измерения.
6. Выводы.
7. Ответ.

4.6 Контрольные вопросы

1. В чём заключается правило параллелограмма сил?
2. При каком условии направление равнодействующей делит пополам угол между направлениями составляющих сил?
3. При каких значениях угла α (рисунок 3.6) и сил F_1 и F_2 точка будет в равновесии?

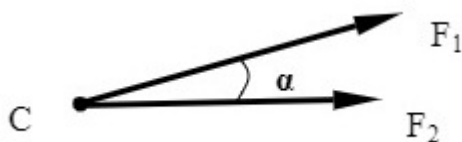


Рисунок 4.6

Литература

Основная литература

1. Барсуков, В. И. Физика. Механика [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2019. — 248 с. — 978-5-8265-1441-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63918.html>
2. Зюзин, А. В. Физика. Механика [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А. В. Зюзин, С. Б. Московский, В. Е. Туров. — Электрон. текстовые данные. — М. : Академический Проект, 2019. — 436 с. — 978-5-8291-1745-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/36623.html>
3. Трофимова, Т. И. Физика : учебник : для студентов вузов, обучающихся по техн. напр. подготовки / Т.И. Трофимова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2018. - 346 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование) (Бакалавриат). - Предм. указ.: с. 330-339. - ISBN 978-5-7695-9820
4. Трофимова, Т. И.; Курс физики с примерами решения задач: В 2-х т. : учебник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов, Т.2. - М. : Кнорус, 2018. - 378 с. - (Бакалавриат). - Прил.: с. 376-378. - ISBN 978-5-406-04428-5.
.htm l (дата обращения: 15.10.2019). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей

Дополнительная литература

1. Повзнер, А. А. Физика. Базовый курс. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. А. Повзнер, А. Г. Андреева, К. А. Шумихина. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 168 с. — 978-5-7996-1701-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/68406.html>
2. Никеров, В. А. Физика. Современный курс [Электронный ресурс] : учебник / В. А. Никеров. — Электрон. текстовые данные. — М. : Дашков и К, 2016. — 454 с. — 978-5-394-02349-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14114.html>
3. Трофимова, В. Л. Природопользование : толковый словарь / В. Л. Трофимова. - М. : Финансы и статистика, 2002. - 184 с. - Библиогр.: с. 182-184. - ISBN 5-279-02487-2
4. Чертов, А. Г. Задачник по физике : [учеб. пособие для втузов] / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. - 8-е изд., перераб. и доп. - М. : Физматлит, 2007. - 640 с. : ил. - Прил.: с. 623-640. - ISBN 5-94052-098-7

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

1. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика»: Часть 1. Механика. Молекулярная физика. дисциплине для студентов направления 09.03.02 Информационные системы и технологии /Сост. Сыроватская В.И., 2021/– Невинномысск, НТИ СКФУ, 2021. - 80 с.

2. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся при подготовке к занятиям по направлениям подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 18.03.01 Химическая технология, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств (магистратура), 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, / сост.: М.В. Должикова, А.А. Евдокимов, Е.Н. Павленко, А.И. Колдаев, А.В. Пашковский, Т.С. Чередниченко, - Невинномысск: НТИ (филиал) СКФУ, 2021.-45с