

**ЛАБОРАТОРНЫЙ
ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ**

ЧАСТЬ I

**Москва
2013 г.**

Пособие подготовили:

Воинкова И.В.

Зуковская Ю.Э.

Казанская А.Я.

Лукашевский М.В.

Редактор Казанская А.Я.

Лабораторный практикум по физике для учащихся 10 классов
лицея № 1502 при МЭИ. Часть I.

Лабораторный практикум является пособием для выполнения лабораторных работ по программе 10 класса ГОУ «Лицей № 1502 при МЭИ». Содержит указания к выполнению лабораторных работ и краткие теоретические введения к ним.

Содержание

| | стр. |
|---|-------------|
| Введение | 4 |
| Порядок работы в лаборатории | 4 |
| 1. Погрешности физических измерений | 5 |
| 2. Определение погрешностей в лабораторных работах | 7 |
| 3. Оформление результатов работы | 41 |
| 4. Схема расчета погрешностей | 15 |
| 5. Пример обработки результатов измерений | 16 |
| Лабораторная работа № 1. | |
| Измерение объемов тел правильной формы | 19 |
| Лабораторная работа № 2. | |
| Исследование равнопеременного движения | 25 |
| Лабораторная работа № 3. | |
| Изучение свойств винтовой пружины | 37 |
| Лабораторная работа № 4. | |
| Динамика движения тела по наклонной плоскости | 43 |
| Теоретическое введение к лабораторным работам № 5 и № 6 | |
| Законы сохранения в механике | 51 |
| Лабораторная работа № 5. | |
| Изучение закона сохранения импульса | 53 |
| Лабораторная работа № 6. | |
| Изучение законов сохранения в механике на модели копра | 60 |
| Приложение | 68 |

Введение

Настоящий сборник лабораторных работ по физике предназначен для учащихся 10 классов лицея № 1502.

Выполнение лабораторных работ составляет очень важную часть обучения физике. Как известно, физика – наука экспериментальная, математическая формулировка законов физики является следствием наблюдений, опытов. Экспериментом также проверяются новые теоретические идеи физиков. Выполняя лабораторные работы, Вы приобретаете навыки исследовательской деятельности, обучаетесь методам получения и обработки результатов.

Сборник составлен в соответствии с программой по физике для первого полугодия 10 класса и включает в себя описание 6 лабораторных работ по изучению законов механики.

Пункты разделов *Обработка результатов измерений*, отмеченные знаком *, выполняются по указанию преподавателя.

Порядок работы в лаборатории

Учащиеся допускаются к выполнению лабораторной работы, если

- освоили теоретический материал, относящийся к данной работе,
- знают порядок ее выполнения,
- подготовили форму отчета (протокол).

Содержание формы отчета (протокола)

(Разделы 1 – 8 должны быть подготовлены дома в рукописном виде в рабочей тетради)

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Формулировка цели работы.
3. Краткое изложение теоретических основ работы.
4. Расчетные формулы.
5. Схема установки (в виде рисунка или электрической схемы). Все основные элементы схемы должны быть пронумерованы арабскими цифрами; расшифровка цифр должна быть дана в подписи под рисунком.
6. Таблица спецификации измерительных приборов.
7. Данные установки, табличные данные.
8. Таблицы результатов измерений.
9. Расчет искомых величин.
10. Расчет погрешностей прямых измерений.

11. Запись результатов прямых измерений в виде доверительных интервалов.
12. Расчет погрешностей косвенных измерений.
13. Запись окончательного результата в виде доверительного интервала.
14. Выводы по результатам экспериментов.

Лабораторные работы выполняют бригады (коллективы в 2-3 человека) строго по графику – расписанию. В ходе работы удобно распределить роли: один выполняет эксперимент, другой записывает результаты в протокол; затем ролями меняются. Это позволяет с одной стороны, всем овладеть навыками работы с приборами, с другой стороны, исключить фактор персонального восприятия показаний прибора. Экспериментальные данные необходимо заносить в протокол *в тех единицах, в которых они измеряются.*

В конце занятия учащиеся (по бригадам) предоставляют преподавателю таблицу результатов измерений и результат расчета искомой физической величины. При этом протокол *визуруется преподавателем.* Расчет погрешностей полученных величин, оформление работы, выводы могут быть выполнены в ходе последующей домашней работы и в ***обязательном порядке*** представлены на следующем занятии на проверку преподавателю.

По завершении цикла, включающего 1, 2 или 3 работы, проводится *защита лабораторных работ.* Для успешной защиты необходимо

- представить полностью оформленные протоколы работ;
- изучить теоретический материал соответствующей темы по лекциям или предлагаемой литературе;
- уметь отвечать на вопросы, приведённые в конце каждой работы;
- объяснять полученные в работе результаты.

График лабораторных работ должен быть выполнен полностью, работы, пропущенные по любой причине, выполняются в дополнительное время (по расписанию лаборатории).

1. Погрешности физических измерений

Целью эксперимента является определение численного значения физической величины. ***Истинное значение физической величины*** – это такое значение, которое идеальным образом отображает соответствующие свойства объекта. Определение значения физической величины

опытным путем с помощью специальных технических средств называется *измерением*.

1.1 Прямые и косвенные измерения

Прямым измерением – называют измерение, при котором значение физической величины находят непосредственно из опытных данных, как показания использованных измерительных приборов. **Косвенное измерение** – такое, при котором значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и другими величинами, определяемыми путем прямых измерений, то есть вычисляют по формуле.

Например, требуется определить ускорение тела при его прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости. Прямым измерением определяются время t (по секундомеру) и путь S (по линейке). Ускорение a определяется в результате косвенного измерения, то есть вычисляется по формуле $a = \frac{2S}{t^2}$, которая следует из соотношения

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

При проведении измерений вследствие несовершенства методов и средств измерений, непостоянства внешних условий получают не истинное, а приближенное значение физической величины. Процесс измерения можно считать законченным только тогда, когда указано не только значение измеренной величины, но и возможное отклонение его от истинного значения – погрешность.

1.2. Точность измерений. Погрешность измерений

1.2.1 Понятие погрешности

Точность измерений определяется близостью результата измерения к истинному значению измеряемой величины. Точность измерений характеризуется погрешностью измерения.

По форме числового выражения различают два вида погрешности: абсолютную и относительную.

Абсолютная погрешность Δx – величина возможного отклонения измеренного значения $x_{\text{измер}}$ от истинного. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины и определяет границы числового интервала, в котором с вероятностью, близкой к единице, содержится истинное значение величины x (рис. 1).

Для истинного значения величины x справедливо соотношение:

$$x_{\text{измер}} - \Delta x \leq x \leq x_{\text{измер}} + \Delta x. \quad (1)$$

Числовой интервал $2\Delta x$, в котором с вероятностью, близкой к единице, содержится истинное значение величины x , называется *доверительным интервалом*.

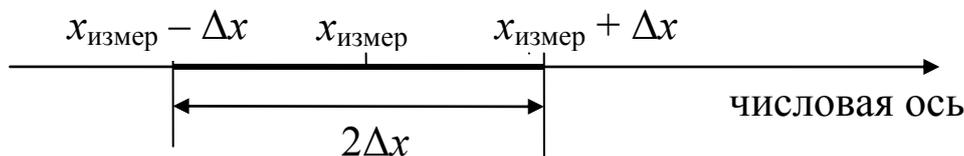


рис. 1

Относительная погрешность δ_x – безразмерная величина, равная отношению абсолютной погрешности к измеренному значению величины, может быть выражена в процентах:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{измер}}} \quad \text{или} \quad \delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{измер}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

2. Определение погрешностей в лабораторных работах

2.1. Вычисление погрешностей прямых измерений

При оценке точности прямого измерения будем учитывать случайную погрешность и погрешность средства измерения.

2.1.1. Случайная погрешность

Выполнив n измерений величины x при неизменных условиях опыта, получим ее значения: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$. Разброс значений x_i связан со случайной погрешностью измерения величины x . Наилучшим приближением к истинному значению измеряемой величины x является *среднее арифметическое* измеренных значений:

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n}. \quad (3)$$

Степень разброса результатов измерения и *случайную погрешность* можно оценить по величине среднего отклонения результатов от среднего значения:

$$\Delta x_{\text{случ}} = \frac{|x_{\text{ср}} - x_1| + |x_{\text{ср}} - x_2| + \dots + |x_{\text{ср}} - x_i| + \dots + |x_{\text{ср}} - x_n|}{n}, \quad (4)$$

где x_i – (i -ое – любое, некоторое) значение измеренной величины; $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение, рассчитанное по формуле (3); n – количество измерений одной и той же величины в одних и тех же условиях.

2.1.2. Погрешность средств измерений (приборная, или инструментальная погрешность)

Погрешность средства измерения $\Delta x_{\text{пр}}$ – разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины.

Погрешность средства измерения является систематической, то есть даёт отклонение измеренной величины от истинного значения в одну сторону, но мы никогда не знаем, в какую именно. Любой прибор позволяет проводить измерения лишь с определенной точностью, погрешность зависит от вида прибора.

- a) В приборах, у которых переход от одного значения к другому осуществляется скачком (стрелочный секундомер, весы с разновесами), инструментальная погрешность равна *величине скачка*.
- b) Инструментальная погрешность приборов, снабженных нониусом (штангенциркуль, микрометр), равна точности нониуса:

$$\text{Точность нониуса} = \frac{\text{цена деления основной шкалы}}{\text{число делений нониуса}}$$

- c) Погрешности электроизмерительных *стрелочных* приборов рассчитываются по классу точности.

Класс точности K определен отношением абсолютной погрешности Δx к используемому пределу измерения прибора X_{max} и выражен в процентах

$$K = \frac{\Delta x}{X_{\text{max}}} \cdot 100\%.$$

Следовательно, абсолютная погрешность измерения данным прибором рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \frac{K}{100} \cdot X_{\text{max}}. \quad (5)$$

Электроизмерительные приборы имеют восемь классов точности: $K=(0.05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0)$. Чем выше класс точности, тем меньше значение K и меньше погрешность измерения.

- d) Погрешность измерения *цифровыми* приборами рассчитывается по формулам, представленным в *паспорте* прибора.
- e) Для прочих приборов с делениями (линейка, транспортир, термометр и т. п.) в качестве инструментальной погрешности принимается погрешность отсчёта, равная половине цены деления шкалы прибора.

2.1.3. Полная погрешность прямых измерений

Результирующая погрешность прямого измерения рассчитывается по формуле:

$$\Delta x_{\text{прям}} = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}} \quad (7)$$

Если $\Delta x_{\text{сл}} \ll \Delta x_{\text{пр}}$, то

$$\Delta x_{\text{прям}} \approx \Delta x_{\text{пр}} \quad (7a)$$

В случае, если $\Delta x_{\text{сл}} \gg \Delta x_{\text{пр}}$, погрешностью средства измерений можно пренебречь. Однако, это одновременно говорит о том, что эксперимент проведен некачественно. Необходимо увеличить число измерений, чтобы уменьшить случайную погрешность.

Если данная физическая величина измеряется *один раз*, то в качестве погрешности прямого измерения берут *инструментальную* погрешность $\Delta x_{\text{пр}}$.

Значение результата прямых измерений записывается в виде

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x. \quad (8)$$

2.2. Погрешности физических постоянных, табличных данных, данных установок (погрешности округления)

2.2.1. Физические постоянные (константы) считают точными величинами. В этом случае *значение данной величины подставляется в расчетную формулу с числом значащих цифр на одну больше, чем число значащих цифр, полученных в результате прямых измерений*. При этом относительная погрешность округления константы окажется на порядок меньше погрешности прямого измерения, и ею можно пренебречь.

Многие табличные данные, используемые в расчетах, представлены с большой точностью. В этом случае при выборе числа значащих цифр для подстановки в расчетную формулу руководствуются предыдущим правилом.

2.2.2. Если же табличные данные, данные установок определены с точностью, сопоставимой с результатом прямых измерений, то такие данные считаются приближенными. В этом случае погрешность табличной величины принимают равной *половине единицы младшего разряда используемого числа*.

Пример1. Пусть дано $m = 8,5$ г. Младший разряд числа – десятые (цифра 5). Абсолютная погрешность округления составляет половину от

одной десятой: $\Delta m = \frac{0,1}{2} = 0,05$ г;

Пример 2. Пусть дано $M = 4$ г. Младший разряд числа – целые (цифра 4). Абсолютная погрешность округления составляет половину от одной целой: $\Delta M = \frac{1}{2} = 0,5$ г.

2.3. Погрешность косвенных измерений

Результатом косвенных измерений является величина Y , рассчитанная по соответствующей формуле с использованием средних значений результатов прямых измерений.

Погрешность косвенно измеряемой величины определяется погрешностями величин, полученных в процессе прямых измерений, а также погрешностями табличных данных и других постоянных, входящих в расчетную формулу.

Формула для вычисления *относительной погрешности* косвенного измерения $\delta_Y = \frac{\Delta Y}{Y}$ зависит от вида расчётной формулы для Y и *приводится в описании каждой лабораторной работы*.

Абсолютная погрешность косвенного измерения ΔY очевидно может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta Y = Y \cdot \delta_Y \quad (9)$$

3. Оформление результатов работы

3.1. Правила записи чисел

В десятичной системе любое число записывают с помощью цифр 0, 1, 2, ..., 9. Перечисленные цифры, кроме нуля, называют *значащими*. Ноль тоже относят к значащим цифрам, если он стоит в середине или в конце числа. Например, *все выделенные* цифры в числе 00**648,3600** являются значащими. Результаты физических и технических экспериментов принято записывать только значащими цифрами. Наиболее удобна следующая запись: *запятую ставят после первой отличной от нуля цифры, а значащую часть числа умножают на десять в соответствующей целой степени*. Например, вместо 0,000567 пишут $5,67 \cdot 10^{-4}$, а вместо 3450000 пишут $3,45 \cdot 10^6$.

3.2. Округление результатов промежуточных расчетов

Количество значащих цифр в *промежуточных расчётах* не должно быть слишком большим. Как правило, числа, получаемые при работе с калькулятором, необходимо округлять, оставляя *не более 4-5 значащих цифр*.

Приведем примеры округления чисел до *четырёх значащих цифр* $0,0874425 \approx 0,08744$; $784,648 \approx 784,6$; $369279 \approx 369300$.

3.3. Правило округления абсолютной погрешности

Количество значащих цифр абсолютной погрешности не должно быть более двух. Две цифры оставляют в том случае, если первая значащая цифра погрешности «1» или «2». Если первая цифра больше «2», то абсолютную погрешность округляют так, чтобы оставалась *одна значащая цифра* (см. далее примеры).

3.4. Правила округления и записи результата

Результат прямого или косвенного измерения (x или Y) должен быть округлен (или уточнен) с учетом погрешности измерения: *разряд последней цифры результата должен совпадать с разрядом последней значащей цифры погрешности*.

Результат записывается с указанием погрешности, определяющей доверительный интервал, с соответствующими единицами измерения:

$$Y = Y \pm \Delta Y \quad (10)$$

Пример 1.

В эксперименте было определено сопротивление проводника $R = 2,756$ Ом и абсолютная погрешность $\Delta R = 0,038$ Ом. По правилу 3.3 округляем абсолютную погрешность. Первая значащая цифра «3», она больше «2» и стоит в разряде **сотых**. Следовательно, абсолютную погрешность округляем до *одной* значащей цифры, т.е. до разряда **сотых**, получаем $\Delta R = 0,04$ Ом. Далее применяем правило 3.4: в округленном значении абсолютной погрешности последняя значащая цифра «4» стоит в разряде **сотых**, следовательно, округляем результат до **сотых**: $R = 2,76$ Ом. Окончательный результат записываем в виде: $R = (2,76 \pm 0,04)$ Ом.

Пример 2.

В эксперименте был определен коэффициент трения поверхности $\mu = 0,32438$ и абсолютная погрешность $\Delta \mu = 0,0197$. По правилу 3.3 округляем абсолютную погрешность. Первая значащая цифра «1», следовательно, в абсолютной погрешности после округления должно быть *две* значащие цифры. Погрешность округляем до следующего разряда, т.е. до **тысячных**, получаем $\Delta \mu = 0,020$. Далее применяем правило 3.4: в округленном значении абсолютной погрешности последняя значащая цифра «0» стоит в разряде **тысячных**, следовательно, округляем результат до **тысячных**: $\mu = 0,324$. Окончательный результат записываем в виде: $\mu = 0,324 \pm 0,020$.

Пример 3.

В эксперименте была определена емкость конденсатора $C = 4,1435 \cdot 10^{-8}$ Ф и абсолютная погрешность $\Delta C = 1,23 \cdot 10^{-9}$ Ф. При записи результата представим значение величины и ее погрешность в виде $X \cdot 10^{-8}$, то есть с одинаковым показателем степени 10. Окончательный результат получим в виде: $C = (4,14 \pm 0,12) \cdot 10^{-8}$ Ф.

3.5. Правило сравнения результатов

Пусть истинное значение изучаемой величины известно или в процессе работы одна и та же величина определяется разными способами.

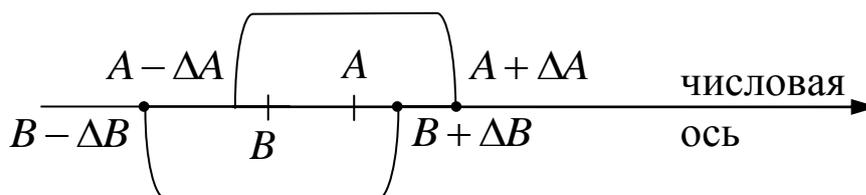


рис. 2

Значения двух величин A и B считаются совпадающими, если их доверительные интервалы *перекрываются* (рис. 2).

В этом случае, очевидно, выполняется соотношение:

$$|A - B| \leq \Delta A + \Delta B \quad (11)$$

3.6. Построение графиков

При изучении зависимости одной измеряемой величины от другой целесообразно представить результаты в форме графика. Главное достоинство графика – его наглядность. График позволяет получить общее качественное представление о характере зависимости, а также судить о соответствии экспериментальных данных той или иной теоретической зависимости. На графиках легко видеть “выпадение” точек, которые, как правило, соответствуют наблюдениям с грубыми погрешностями (промахами).

Графики следует строить на *листах миллиметровой бумаги*. Масштаб графика по обеим осям нужно выбирать так, чтобы предполагаемые зависимости обладали наибольшей наглядностью и заполняли большую часть графика. Поле графика заключают в прямоугольную рамку, согласуя ее с основными линиями сетки. Стрелки на концах экспериментальных графиков не ставят (стрелки принято ставить лишь на иллюстрационных графиках качественного характера, построенных в произвольном масштабе). На концах осей (если на оси используется

лишь интервал, то и в начале оси) нужно указать обозначение соответствующих физических величин и единицы измерений этих величин.

Учитывая, что миллиметровая бумага имеет очень мелкую сетку, оцифровывать нужно лишь деления крупной сетки. Допустимые значения, определяющие масштабы, следующие: 0,1,2,3,...; 0,2,4,6,...; 0,5,10,... Эти значения могут быть умножены на $10^{\pm n}$. Не следует наносить на оси числовые значения величин, полученных в ходе опыта!

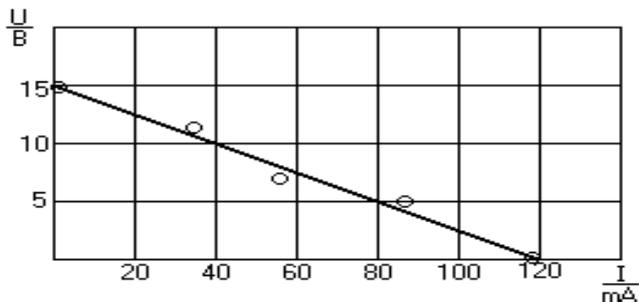
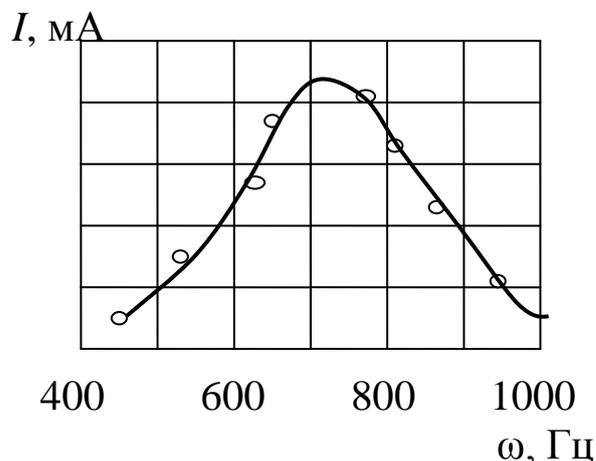


График зависимости напряжения от силы тока на участке цепи



Резонансная кривая колебательного контура

рис. 3

Размеры экспериментальных точек должны быть соотнесены с погрешностями измерения соответствующих величин. Линия графика должна быть гладкой, она проводится так, чтобы по обе стороны от нее располагалось примерно одинаковое число “выпадающих” точек.

Под графиком должно быть подписано пояснение или название. Возможные варианты графического представления результатов показаны на рис. 3.

3.7. Нахождение физических величин по графику

Часто графики строятся с целью нахождения различных физических величин. Проще всего это сделать, если искомая физическая величина является коэффициентом пропорциональности в линейной функции $y = k \cdot x + y_0$ (например, жесткость пружины является коэффициентом пропорциональности между значениями силы упругости пружины и деформации). Рекомендуемая последовательность действий:

- 1) нанести на график точки, соответствующие измеренным значениям;
- 2) провести оптимальную прямую через эти точки, таким образом, что бы количество экспериментальных точек, расположенных выше и ниже оптимальной прямой, было примерно равным (см. рис. 4);

3) ограничить полосу, в которой находятся точки, прямыми, параллельными оптимальной линии и проходящими через наиболее удаленные от оптимальной прямой точки (на рис. 4 – штриховые линии); 4) определить тангенс угла наклона оптимальной прямой по формуле

$$k = \operatorname{tg}\alpha = \frac{y_m - y_0}{x_0} \text{ в соответствующих единицах измерения.} \quad (12)$$

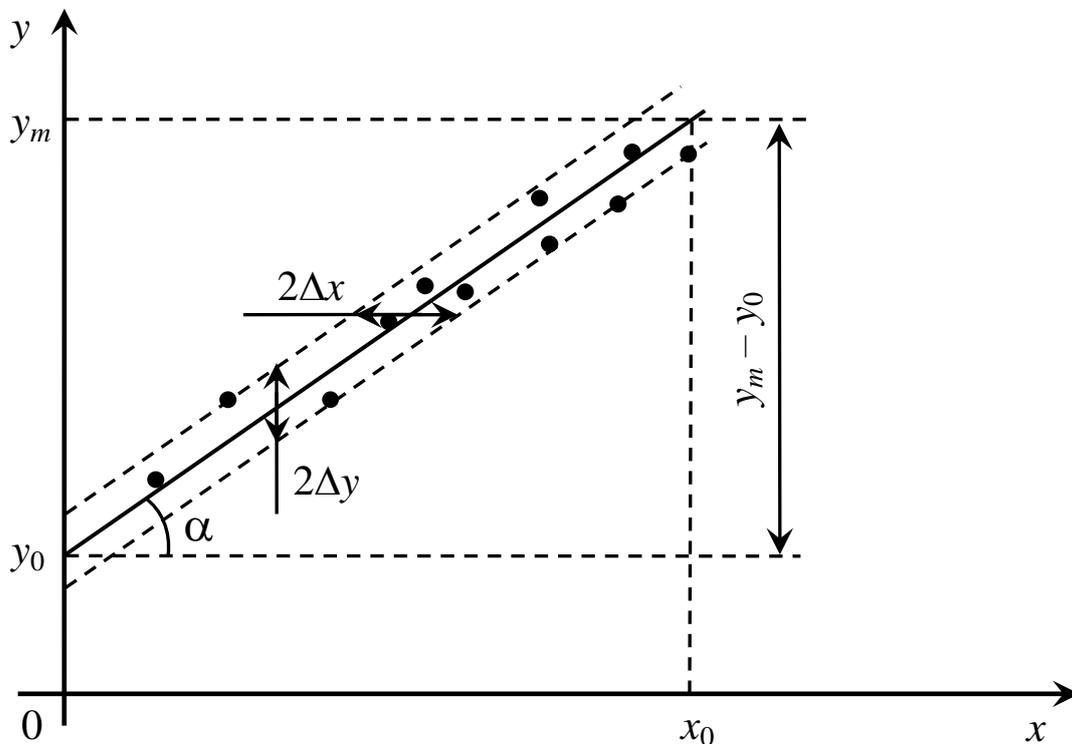


рис. 4

Погрешность искомой физической величины определяется по формулам

$$\delta k = \frac{\Delta y}{y_m} + \frac{\Delta x}{x_0}, \quad \Delta k = k \cdot \delta k. \quad (13)$$

Абсолютные погрешности Δy и Δx определяются из графика, как показано на рис. 4, по соответствующим расстояниям между вспомогательными штриховыми линиями.

4. Схема расчета погрешностей

(в скобках указан раздел подробного описания)

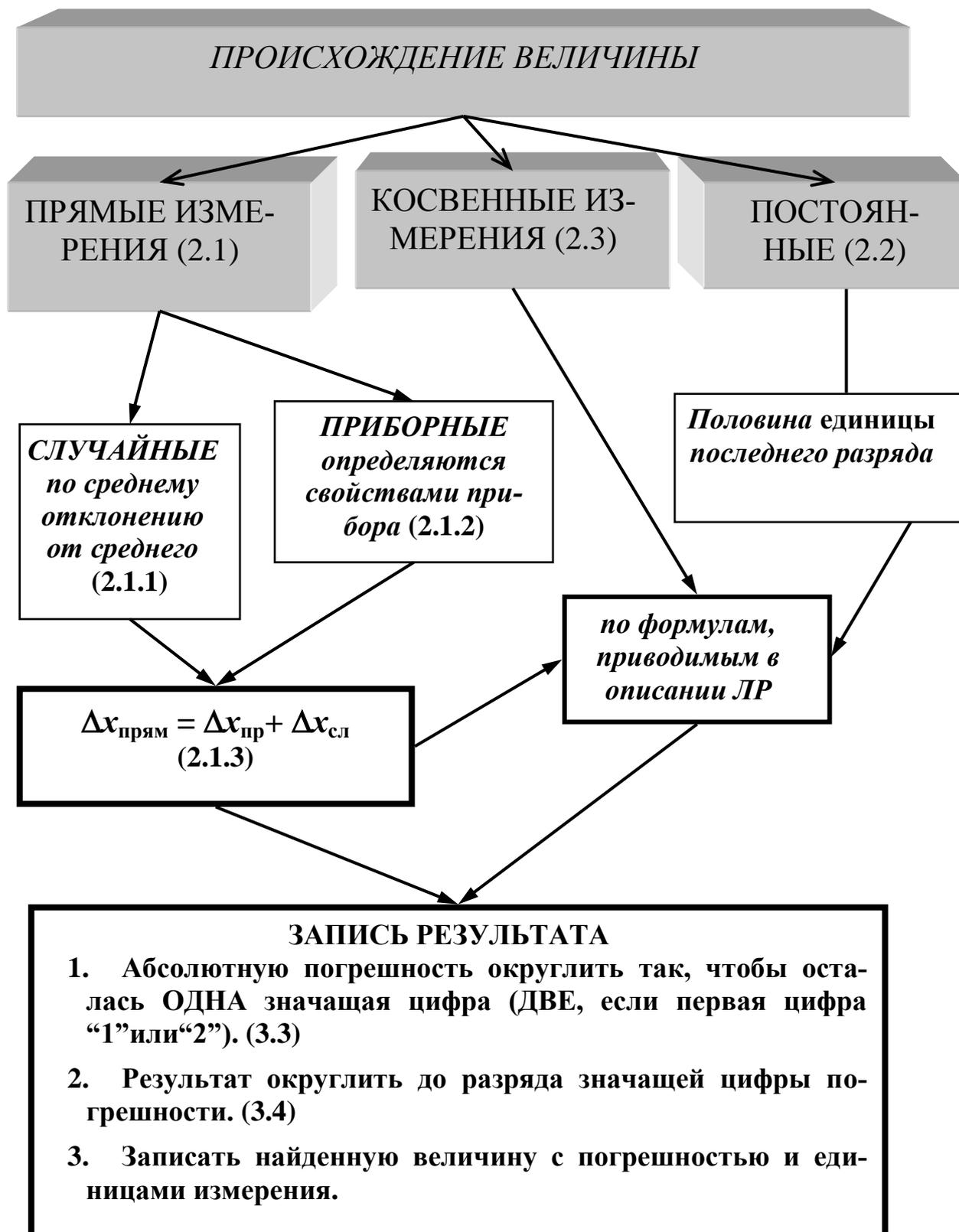


рис. 5

5. Пример обработки результатов измерений

Задание

Рассчитать объем краски, необходимый для окраски забора. Расход краски составляет $P = 0,30 \pm 0,04$ л/м². Размеры забора: высота $h = 1,8$ м, измерена однократно рулеткой с ценой деления 1 мм; длина измерена 5 раз дальномером с приборной погрешностью 0,2 м, результаты измерения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения длины забора дальномером

| № п/п | L_i , м |
|-------|-----------|
| 1 | 15,8 |
| 2 | 16,2 |
| 3 | 16,0 |
| 4 | 15,8 |
| 5 | 15,8 |

Необходимый объем краски определяется по формуле $V = S \cdot P$, где S – площадь поверхности забора.

Расчетная формула $V = h \cdot L \cdot P$.

Рассчитать погрешность, полученного объема краски по формулам относительная погрешность $\delta V = \delta h + \delta L + \delta P$, (*)

абсолютная погрешность $\Delta V = V \cdot \delta V$.

Расчеты

Рассчитаем среднее значение результата прямого измерения длины забора

$$L_{\text{ср}} = \frac{15,8 + 16,2 + 16,0 + 15,8 + 15,8}{5} = 15,92 \text{ м.}$$

Площадь красочного покрытия

$$S = 1,8 \cdot 15,92 = 28,66 \text{ м}^2.$$

Расчет результатов косвенных измерений

Необходимый объем краски

$$V = 1,8 \cdot 15,92 \cdot 0,3 \approx 8,597 \text{ л} \quad \text{проверка размерности: } \frac{\text{л}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 = \text{л.}$$

Расчет погрешностей прямых измерений

– Погрешность высоты забора

Согласно п. 2.1.2 е) введения, приборная погрешность рулетки составляет $\Delta h_{\text{пр}} = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}$.

Поскольку величина h измерялась один раз, то, согласно п. 2.1.3 введения, полная погрешность высоты забора принимается равной ее приборной погрешности $\Delta h = \Delta h_{\text{пр}} = 0,0005 \text{ м}$.

Рассчитаем относительную погрешность высоты забора

$$\delta h = \frac{0,0005}{1,8} = 2,78 \cdot 10^{-4}$$

– Погрешность длины забора

После многократных измерений необходимо оценить случайную погрешность. Для этого найдем отклонения от среднего ΔL_i и запишем их в соответствующие ячейки таблицы 2.

Таблица 2. Расчет случайной погрешности измерения длины забора

| № п/п | L_i , м | $ L_{\text{ср}} - L_i $, м |
|--------|-----------|-----------------------------|
| 1 | 15,8 | 0,12 |
| 2 | 16,2 | 0,28 |
| 3 | 16,0 | 0,08 |
| 4 | 15,8 | 0,12 |
| 5 | 15,8 | 0,12 |
| средн. | 15,92 | 0,144 |

Вычислим случайную погрешность длины забора

$$\Delta L_{\text{сл}} = \frac{0,12 + 0,28 + 0,08 + 0,12 + 0,12}{5} = 0,144 \text{ м.}$$

Вычислим полную погрешность длины забора

$$\Delta L = 0,2 + 0,144 = 0,344 \approx 0,3 \text{ м. (округлили до одной значащей цифры)}$$

Вычислим относительную погрешность длины забора

$$\delta L = \frac{0,3}{15,92} = 0,0188.$$

Запишем результат измерения длины забора в виде доверительного интервала (согласно стр. 15 Схема расчета погрешностей)

$$L = (15,9 \pm 0,3) \text{ м}$$

Рассчитаем относительную погрешность расхода краски

$$\delta P = \frac{\Delta P}{P} = \frac{0,04}{0,3} = 0,133.$$

Расчет погрешностей косвенных измерений

По (*) $\delta V = 2,78 \cdot 10^{-4} + 0,0188 + 0,133 \approx 0,152 \approx 15 \%$,

$\Delta V = 0,152 \cdot 8,597 = 1,3067 \approx 1,3$ л. (округлили до двух значащих цифр)

Запишем найденное значение объема краски в виде доверительного интервала

Ответ: $V = (8,6 \pm 1,3)$ л.

Левая граница доверительного интервала для объема краски оказалась равной $8,6 - 1,3 = 7,3$ л, правая граница – $8,6 + 1,3 = 9,9$ л.

Изобразим на числовой оси в выбранном масштабе значение необходимого объема краски с доверительным интервалом.

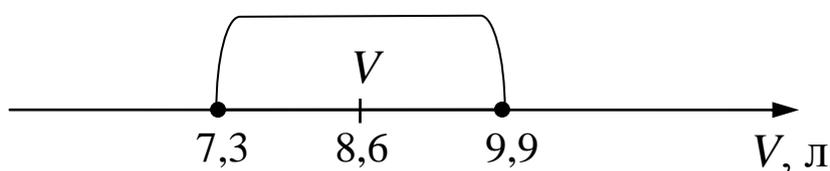


рис. 6

Выводы

Оценка погрешности позволяет определить, сколько краски нужно взять, что бы не оказаться перед недокрашенным забором – ведь при всех измерениях были допущены погрешности. На основании выполненных расчетов нельзя сказать, сколько потребуется краски *точно*, можно утверждать, что будет израсходовано не менее 7,3 литров краски и не более 9,9 литров.

Лабораторная работа № 1

Измерение объемов тел правильной формы

Цель работы: проведение прямых и косвенных измерений и овладение методами расчета их погрешностей.

Один из способов измерения объема тела правильной формы заключается в измерении линейных размеров тела измерительным прибором с последующим расчетом по формулам, известным из геометрии:

$$\text{Для диска} - V_{\text{д}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h \quad (1.1)$$

$$\text{Для параллелепипеда} - V_{\text{п}} = a \cdot b \cdot c, \quad (1.2)$$

где D , h , a , b , c показаны на рис. 1.1.

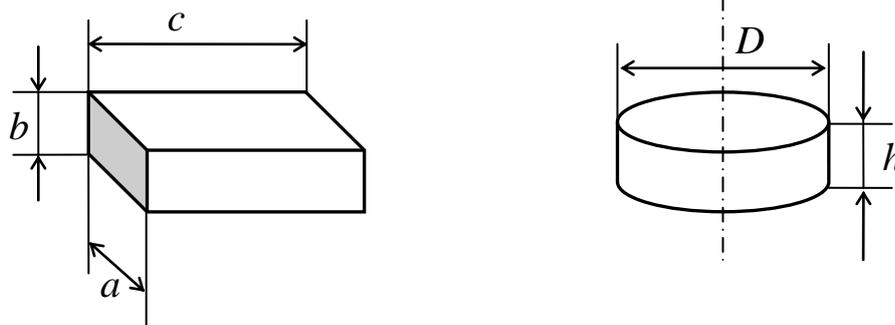


рис. 1.1

Определение линейных размеров является результатом **прямых** измерений. При прямых измерениях нужно учесть приборную и случайную погрешности (см. введение, п. 2.1.).

Чтобы облегчить расчет случайных погрешностей, таблицы результатов измерений № 2, 3, 4 содержат столбцы для вычисления отклонений результатов измерения от среднего значения.

Объем, рассчитанный по формуле с использованием результатов прямых измерений линейных размеров, является результатом *косвенных* измерений. Погрешность объема рассчитывается с учетом погрешностей прямых измерений по формулам, приведенным далее.

При подготовке к работе воспользуйтесь типовым протоколом лабораторной работы приведенном в Приложении.

Описание установки

В данной работе необходимо определить объемы диска и параллелепипеда (рис. 1.1).

Для этого используются: а) измерительная линейка; б) штангенциркуль.

Штангенциркуль – измерительный прибор, позволяющий измерить линейные размеры с большей точностью. Для этого линейку снабжают дополнительной подвижной шкалой – нониусом.

Чтобы произвести измерение, нужно зажать измеряемый объект между выступами (мерительными губками) штангенциркуля. Отсчет производится в два этапа: 1) считать число **целых** делений основной шкалы до нулевого деления нониуса (число миллиметров); 2) считать число делений нониуса до риски, совпадающей с риской основной шкалы (число долей миллиметра).

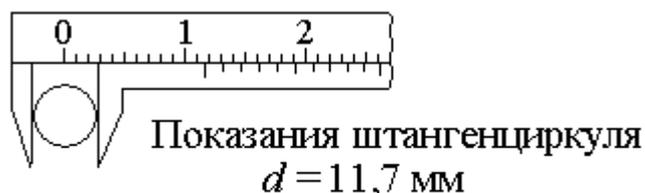


рис. 1.2

Приборная погрешность штангенциркуля равна его точности – α . Точность измерения штангенциркулем α определяется по

формуле $\alpha = \frac{\text{цена деления шкалы}}{\text{число делений нониуса}}$.

Приборная погрешность линейки с миллиметровыми делениями составляет величину 0,5 мм. Погрешности приборов записываются в таблицу спецификации измерительных приборов до начала измерений.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с измерительными приборами, заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификации измерительных приборов.

| № п/п | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|-------|--|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | линейка | | | |
| 2. | штангенциркуль с числом делений нониуса _____ | | | |

2. Измерьте каждый размер параллелепипеда *штангенциркулем* по 5 раз в разных точках параллелепипеда. Результаты измерений запишите в таблицу № 2.

Таблица № 2. Результаты измерения линейных размеров параллелепипеда штангенциркулем.

| № п/п | a_i мм | $ a_{\text{ср}} - a_i $ мм | b_i мм | $ b_{\text{ср}} - b_i $ мм | c_i мм | $ c_{\text{ср}} - c_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| средн. | | | | | | |

3. Измерьте каждый размер параллелепипеда *линейкой* по 5 раз в разных точках параллелепипеда. Результаты измерений запишите в таблицу № 3.

Таблица № 3. Результаты измерения линейных размеров параллелепипеда линейкой.

| № п/п | a_i мм | $ a_{\text{ср}} - a_i $ мм | b_i мм | $ b_{\text{ср}} - b_i $ мм | c_i мм | $ c_{\text{ср}} - c_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| средн. | | | | | | |

4. Измерьте линейные размеры диска штангенциркулем (5 раз каждый размер), убедитесь, что вы измеряете диаметр, а не хорду, для этого в процессе измерения плоскость диска должна располагаться в плоскости штангенциркуля см. рис. 1.2. Результаты измерений запишите в таблицу № 4.

Таблица № 4. Результаты измерения линейных размеров диска

| № п/п | D_i мм | $ D_{\text{ср}} - D_i $ мм | h_i мм | $ h_{\text{ср}} - h_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

5. По окончании прямых измерений приведите измерительные приборы и принадлежности в первоначальный вид. Результаты измерений покажите преподавателю.

Обработка результатов измерений

1. Для каждой из измеренных величин найдите среднее арифметическое значение по формуле: $x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$. Запишите их в таблицы № 2, 3, 4. (Под буквой x понимаются соответственно a, b, c, D, h .)

Расчет результатов косвенных измерений

2. Рассчитайте объемы тел по формулам (1.1), (1.2), используя средние значения D, h, a, b, c , полученные значения выразите в мм³. Покажите преподавателю.

Расчет погрешностей прямых измерений

3. Найдите все отклонения от средних значений $\Delta x_i = |x_{\text{ср}} - x_i|$ для величин a, b и c , записанных в таблице № 2, записывая, полученные значения в соответствующие ячейки таблицы № 2.
4. Вычислите случайные погрешности прямых измерений (средние отклонения от среднего) для величин a, b и c , записанных в таблице № 2, по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = \frac{|x_{\text{ср}} - x_1| + |x_{\text{ср}} - x_2| + |x_{\text{ср}} - x_3| + |x_{\text{ср}} - x_4| + |x_{\text{ср}} - x_5|}{5}, \text{ записывая их в со-}$$

ответствующие ячейки последней строки таблицы № 2.

5. Вычислите полные погрешности прямых измерений для величин a , b и c , записанных в таблице № 2, по формуле $\Delta x = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}}$, используя соответствующие значения приборной погрешности из таблицы № 1.

6. Округлите значения абсолютных погрешностей и результатов прямых измерений для величин a , b и c , записанных в таблице № 2 (см. стр. 15 Запись результата).

7. Вычислите относительные погрешности прямых измерений для величин a , b и c , записанных в таблице № 2, по формуле $\delta x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ср}}}$.

8. Запишите результаты прямых измерений величин a , b и c , записанных в таблице № 2, в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата).

$$x = (x_{\text{ср}} \pm \Delta x) \text{ (единицы измерения)}$$

9. Аналогичным образом обработайте результаты измерений размеров параллелепипеда линейкой и диска, выполнив пункты 3 – 8 для величин a , b , c , D , h , записанных в таблицах № 3 и № 4.

Расчет погрешностей косвенных измерений

10. Вычислите погрешность косвенного измерения объема параллелепипеда, измеренного штангенциркулем, по формулам

$$\delta V_{\text{п}}^{\text{шт}} = \delta a + \delta b + \delta c, \Delta V_{\text{п}}^{\text{шт}} = V_{\text{п}} \cdot \delta V_{\text{п}},$$

используя величины относительных погрешностей прямых измерений, найденных в п. 7.

11. Округлите значение абсолютной погрешности (см. стр. 15 Запись результата).

12. Запишите результат косвенного измерения в виде доверительного интервала, выразите полученные значения в см^3 , м^3 и мм^3 (см. стр. 15 Запись результата)

$$V_{\text{п}}^{\text{шт}} = (V_{\text{ср}} \pm \Delta V) \text{ (единицы измерения)}.$$

13. Вычислите погрешность косвенного измерения объема параллелепипеда, измеренного линейкой, по формулам

$$\delta V_{\text{п}}^{\text{л}} = \delta a + \delta b + \delta c, \Delta V_{\text{п}}^{\text{л}} = V_{\text{п}} \cdot \delta V_{\text{п}},$$

используя величины относительных погрешностей прямых измерений, найденных в п. 9.

14. Вычислите погрешность косвенного измерения объема диска по формулам

$$\delta V_{\text{д}} = 2\delta D + \delta h; \Delta V_{\text{д}} = V_{\text{д}} \cdot \delta V_{\text{д}},$$

используя величины относительных погрешностей прямых измерений, найденных в п. 9.

15. Округлите значения абсолютных погрешностей, найденных в пп. 13, 14.

16. Запишите результаты косвенных измерений в виде доверительного интервала

$$V_{\text{п}}^{\text{д}} = (V_{\text{ср}} \pm \Delta V) \text{ (единицы измерения)}$$

$$V_{\text{д}} = (V_{\text{ср}} \pm \Delta V) \text{ (единицы измерения)}.$$

Анализ полученных результатов

17. Изобразите на числовой оси значения объемов параллелепипеда с доверительными интервалами, полученных с помощью разных измерительных приборов (линейка и штангенциркуль) (см. п. 1.2.1 введения). Значения на числовую ось необходимо наносить с соблюдением *масштаба*.

18. Сравните значения объемов параллелепипеда, полученных с помощью разных измерительных приборов (см. п. 3.5. введения).

19. Сделайте вывод: а) о совпадении результатов измерений объемов, полученных с применением разных измерительных приборов; б) о величинах интервалов погрешностей прямых и косвенных измерений при использовании разных приборов.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения называются прямыми? Значения каких величин в работе будут получены в результате прямых измерений?
2. Какие измерения называются косвенными? Значения каких величины в работе будут получены в результате косвенных измерений?
3. Что такое абсолютная погрешности измерения?
4. Что такое относительная погрешности измерения?
5. Что такое погрешность средства измерения (приборная, инструментальная)?
6. Какие виды погрешностей учитываются при прямых измерениях?
7. От чего зависит погрешность величины при косвенных измерениях?
8. Сформулируйте правила округления абсолютной погрешности.
9. Сформулируйте правила записи результатов в виде доверительного интервала.

10. Как определяется погрешность табличных данных и данных, приведенных на экспериментальных установках?
11. Зачем нужно находить погрешность измерений?
12. При каком условии два значения одной величины, измеренные порознь, можно считать одинаковыми?
13. В каких случаях вычисляют случайную погрешность? По какой формуле?
14. По какой формуле рассчитывается погрешность прямых измерений?
15. Что такое доверительный интервал?
16. Из каких соображений можно выбрать рациональное количество повторений эксперимента?
17. Со сколькими значащими цифрами рационально использовать в лабораторных работах известные константы, например $\pi = 3,141592654$, $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$?

Лабораторная работа № 2

Исследование равнопеременного движения

Литература :

Г.Я. Мякишев «Механика 10 кл», Дрофа, М., 2002 г., 5-ое изд
§1.12, 1.15-1.17, 1.20

Цель работы: определение ускорения и мгновенной скорости при равнопеременном движении.

Теоретическое введение

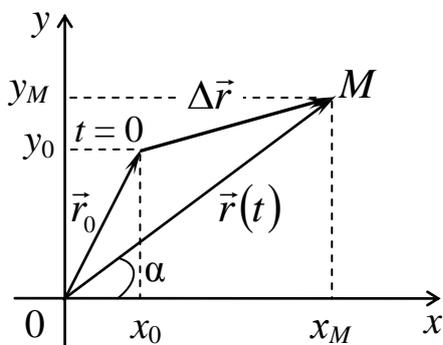


рис. 2.1

Определить положение тела (материальной точки) в пространстве или изменение его положения с течением времени можно только по отношению к другому телу (телу отсчета).

Тело отсчета, связанная с ним система координат и часы образуют *систему отсчета*.

Задать положение материальной

точки M и определить изменение этого положения можно: а) с помощью радиус-вектора \vec{r} , проведенного из начала координат в точку M (рис. 2.1); б) с помощью координат x_M, y_M .

Радиус-вектор точки связан с ее координатами очевидными соотношениями: $x_M = |\vec{r}| \cos \alpha$; $y_M = |\vec{r}| \sin \alpha$.

Для характеристики движения материальной точки вводятся понятия векторов средней скорости за время Δt : $\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$, где $\Delta \vec{r}$ – перемещение за время Δt и мгновенной скорости в данный момент

$\vec{v}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$, где $\Delta \vec{r}$ – перемещение за очень малый промежуток времени Δt . С течением времени может изменяться модуль и направление скорости тела. Изменение скорости характеризует ускорение:

$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, где $\Delta \vec{v}$ – изменение вектора скорости за очень малый промежуток времени Δt . Если $\vec{a} = \text{const}$, движение тела называется *равноускоренным*. В этом случае положение тела в пространстве и его скорость в любой момент времени можно определить, используя кинематические уравнения движения:

$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, где $\Delta \vec{v}$ – изменение вектора скорости за очень малый промежуток времени Δt . Если $\vec{a} = \text{const}$, движение тела называется *равноускоренным*. В этом случае положение тела в пространстве и его скорость в любой момент времени можно определить, используя кинематические уравнения движения:

Если $\vec{a} = \text{const}$, движение тела называется *равноускоренным*. В этом случае положение тела в пространстве и его скорость в любой момент времени можно определить, используя кинематические уравнения движения:

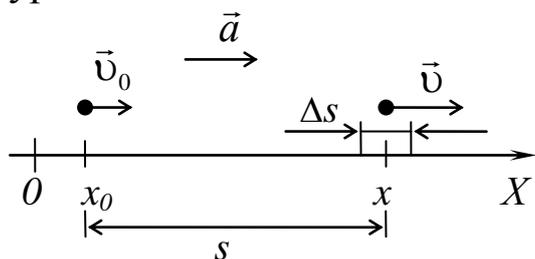


рис. 2.2

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}, \quad (2.1)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t, \quad (2.2)$$

где \vec{r}_0 и \vec{v}_0 – радиус-вектор и скорость тела в момент времени $t = 0$.

В частном случае прямолинейного движения направим координатную ось X вдоль траектории (рис.2.2). Запишем проекции векторных уравнений (1) и (2) на ось X :

$$x = x_0 + v_{0x} \cdot t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (2.3)$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (2.4)$$

В случае движения в одном направлении путь s тела за время t определяется разностью конечной и начальной координат:

$$s = x - x_0 = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

При равноускоренном движении без начальной скорости ($v_{0x} = 0$) путь s , пройденный телом за время t , определяется формулой: $s = \frac{at^2}{2}$, следовательно, измерив t и s , можно определить ускорение a :

$$a = \frac{2s}{t^2}. \quad (2.5)$$

Среднюю скорость на малом участке Δs в некоторый момент t (рис. 2.2) можно считать равной мгновенной скорости в середине этого участка (т.е. считаем, что за малое время Δt , в течение которого тело проходило путь Δs , скорость почти не изменилась):

$$v_{\text{мгн}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (2.6)$$

С другой стороны, эту скорость можно найти по формуле

$$v = at = \frac{2s}{t}, \quad (2.7)$$

где s – весь путь, пройденный телом к моменту времени t .

Описание установки

Соскальзывание тела с наклонной плоскости происходит с постоянным ускорением, что можно доказать используя законы Ньютона. Поэтому равнопеременное движение в данной работе моделируется при помощи наклонной плоскости. Схема установки представлена на рисунке 3. Груз (8) движется по наклонной плоскости, на которую нанесена шкала линейки (2). Когда переключатель режимов работы (6) установлен в положение «Готов» (Г), электромагнит (1) подключен к источнику питания (5) и удерживает груз (8) в верхнем положении. При переводе переключателя (6) в положение «время» (В) происходит одновременное отключение магнита (1) и включение секундомера (4). В момент преры-

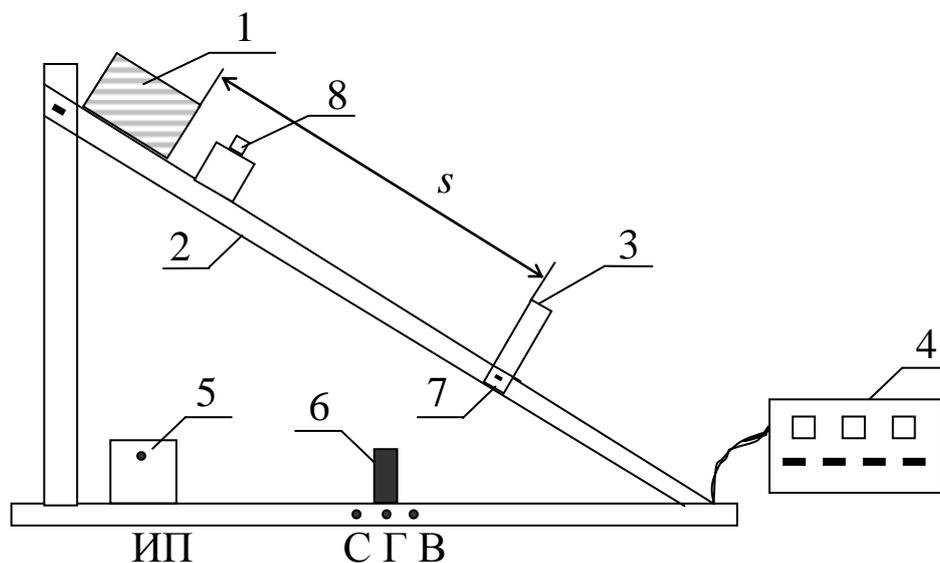
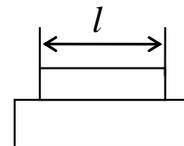


рис. 2.3

вания светового луча фотодатчика (3) движущимся телом (8) происходит выключение секундомера. Поэтому цифровой индикатор секундомера (4) покажет время t , за которое тело прошло путь s от магнита до фотодатчика. Перемещая фотодатчик (3) вдоль линейки (2) можно изменить путь и определить ускорения при разных значениях пройденного пути s .

В верхней части груза (8) закреплен «флажок» длиной l . Длина флажка l соответствует малому расстоянию Δs , на котором скорость тела можно считать почти постоянной (рис. 2.2). При переводе переключателя (6) из положения «готов» (Г) в положение «скорость» (С), секундомер покажет τ – время перемещения груза мимо фотодатчика на малое расстояние $\Delta s = l$. Поэтому:



$$v_{\text{мгн}} \approx \frac{l}{\tau}. \quad (2.8)$$

Порядок выполнения работы

Вариант 1. Использование измерительной системы Vernier и направляющей Vernier

1. Визуально ознакомьтесь с измерительными приборами. Заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|---|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | шкала направляющей | 1210 мм | 1 мм | 1 мм* |
| 2. | встроенный секундомер компьютера LabQuest | — | 10 мкс | 10 мкс |

* примечание: в виду ограниченной точности установки элементов по шкале погрешность принимается равной цене деления шкалы.

Запишите в протокол данные установки:

длина флажка $l = 9,7 \pm 0,2$ мм,

относительная погрешность длины флажка $\delta l = \frac{\Delta l}{l} =$

Длина пути тела $s_1 = 300$ мм, $\Delta s_1 =$, $\delta s_1 = \frac{\Delta s_1}{s_1} =$

$s_2 = 400$ мм, $\Delta s_2 =$, $\delta s_2 =$

Погрешности длины пути Δs_1 и Δs_2 определите, руководствуясь разделом Введение (см. п. 2.1).

2. Установите координату левого (верхнего) фотодатчика равной 100 мм по шкале линейки.

3. Установите координату правого (нижнего) фотодатчика равной 400 мм.

4. Включите компьютер LabQuest.

5. Перейдите в режим табличного отображения данных нажатием соответствующей кнопки на экране.

6. Установите и *удерживайте* тележку так, чтобы ее левый торец совпадал с левым краем наклонной плоскости. Убедитесь, что флажок не перекрывает датчик (индикатор на датчике не горит).

7. Нажмите кнопку «**пуск**» на компьютере (кнопка с символом  на клавиатуре либо в нижнем левом углу экрана).

8. *Без толчка* отпустите тележку.

9. После прохождения тележкой второго фотодатчика, остановите ее.

10. Остановите запись данных, нажав кнопку «**пуск**».

11. Запишите показание секундомера из *третьей* строки таблицы на экране LabQuest в графу t_{1i} таблицы № 2.

Примечание. В таблице на экране LabQuest времени движения тележки, затраченным на прохождение пути s будет соответствовать показание секундомера в момент закрытия (**blocked**) второго (нижнего) фотодатчика. Это значение будет выведено в *третьей* строке таблицы.

Таблица № 2. Результаты измерений времени при длине пути s_1 .

| № п/п | $s_1 = 300$ мм | | | |
|--------|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | t_{1i} , с | $ t_{1cp} - t_{1i} $, с | τ_{1i} , с | $ \tau_{1cp} - \tau_{1i} $, с |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

12. Рассчитайте разность времен открытия (**unblocked**) (четвертая строка таблицы на экране) и закрытия (**blocked**) (третья строка) второго фотодатчика.

13. Запишите полученное значение в графу τ_{1i} таблицы № 2.

14. Повторите пункты 6-13 пять раз.

15. Установите координату правого (нижнего) фотодатчика равной 500 мм.

16. Повторите пункты 6-13 еще пять раз для измерения отрезков времени t_2 и τ_2 , запишите полученные значения в таблицу № 3.

Таблица № 3. Результаты измерений времени при длине пути s_2 .

| № п/п | $s_2 = 400$ мм | | | |
|--------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|---|
| | $t_{2i}, \text{с}$ | $ t_{2\text{ср}} - t_{2i} , \text{с}$ | $\tau_{2i}, \text{с}$ | $ \tau_{2\text{ср}} - \tau_{2i} , \text{с}$ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

Вариант 2. Использование измерительной системы Vernier и направляющей для скольжения тела

1. Визуально ознакомьтесь с измерительными приборами. Заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|---|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | шкала линейки | | | |
| 2. | встроенный секундомер компьютера LabQuest | — | 10 мкс | 10 мкс |

Запишите в протокол данные установки:

длина флажка $l =$,

относительная погрешность длины флажка $\delta l = \frac{\Delta l}{l} =$

Длина пути тела $s_1 = 300$ мм, $\Delta s_1 =$, $\delta s_1 = \frac{\Delta s_1}{s_1} =$

$s_2 = 400$ мм, $\Delta s_2 =$, $\delta s_2 =$

Погрешности длины пути Δs_1 и Δs_2 определите, руководствуясь разделом Введение (см. п. 2.1).

2. Установите координату правого (нижнего) фотодатчика, соответствующей длине пути тела 300 мм (за дополнительными указаниями обратитесь к учителю).

3. Включите компьютер LabQuest.

4. Перейдите в режим табличного отображения данных нажатием соответствующей кнопки на экране.

5. Переведите переключатель режимов работы (6) в положение «готов» (Г), после чего установите груз у начала линейки (2) вплотную к электромагниту (1).

6. Нажмите кнопку «**пуск**» на компьютере (кнопка с символом  на клавиатуре либо в нижнем левом углу экрана).

7. Переведите переключатель (6) в положение «время» (В).

8. После прохождения тележкой второго фотодатчика, остановите ее.

9. Остановите запись данных, нажав кнопку «**пуск**».

10. Запишите показание секундомера из *третьей* строки таблицы на экране LabQuest в графу t_{1i} таблицы № 2.

Примечание. В таблице на экране LabQuest времени движения тележки, затраченным на прохождение пути s будет соответствовать показание секундомера в момент закрытия (**blocked**) второго (нижнего) фотодатчика. Это значение будет выведено в *третьей* строке таблицы.

Таблица № 2. Результаты измерений времени при длине пути s_1 .

| № п/п | $s_1 = 300$ мм | | | |
|--------|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | t_{1i} , с | $ t_{1cp} - t_{1i} $, с | τ_{1i} , с | $ \tau_{1cp} - \tau_{1i} $, с |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

11. Рассчитайте разность времен открытия (**unblocked**) (четвертая строка таблицы на экране) и закрытия (**blocked**) (третья строка) второго фотодатчика.

12. Запишите полученное значение в графу τ_{1i} таблицы № 2.

13. Повторите пункты 5-12 пять раз.

14. Установите координату правого (нижнего) фотодатчика, соответствующей длине пути тела 300 мм.

15. Повторите пункты 5-12 пять раз для измерения отрезков времени t_2 и τ_2 , запишите полученные значения в таблицу № 3.

Таблица № 3. Результаты измерений времени при длине пути s_2 .

| № п/п | $s_2 = 400$ мм | | | |
|--------|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | t_{2i} , с | $ t_{2cp} - t_{2i} $, с | τ_{2i} , с | $ \tau_{2cp} - \tau_{2i} $, с |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

Вариант 3. Использование секундомера СТЦ-1

1. Визуально ознакомьтесь с измерительными приборами. Заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|-------|----------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | шкала линейки | | | |
| 2. | секундомер | | | |

Запишите в протокол данные установки: угол наклона $\alpha = \dots$,
 длина флажка $l = 14,95 \pm 0,05$ мм,
 относительная погрешность длины флажка $\delta l = \frac{\Delta l}{l} =$

Длина пути тела $s_1 = 300$ мм, $\Delta s_1 =$, $\delta s_1 = \frac{\Delta s_1}{s_1} =$
 $s_2 = 400$ мм, $\Delta s_2 =$, $\delta s_2 =$

Погрешности длины пути Δs_1 и Δs_2 определите, руководствуясь разделом Введение (см. п. 2.1).

2. Ослабив винт (7), передвиньте фотодатчик (3) на расстояние $s_1 = 300$ мм от начала линейки (2) и зафиксируйте его в этом положении.

3. Нажмите клавиши «сеть» секундомера (4) и источника питания (5).

4. Переключатель режимов работы (6) переведите в положение «готов» (Г), после чего установите груз у начала линейки (2) вплотную к электромагниту (1).

5. Нажмите клавишу «уст. 0» на секундомере.

6. Переведите переключатель (6) в положение «время» (В). Следите за показаниями секундомера.

7. После соскальзывания груза запишите показания секундомера в графу t_{1i} таблицы № 2.

Таблица № 2. Результаты измерений времени при длине пути s_1 .

| № п/п | $s_1 = 300$ мм | | | |
|--------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|---|
| | $t_{1i}, \text{с}$ | $ t_{1\text{ср}} - t_{1i} , \text{с}$ | $\tau_{1i}, \text{с}$ | $ \tau_{1\text{ср}} - \tau_{1i} , \text{с}$ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

8. Повторите пункты (4, 5, 6, 7) пять раз.

9. Повторите пункты 4 и 5, после чего переведите переключатель (6) из положения «готов» (Г) в положение «скорость» (С). Следите за показаниями секундомера.

10. После соскальзывания груза запишите показания секундомера в графу τ_{1i} таблицы № 2.

11. Повторите пункты 9 и 10 пять раз.

12. Установите фотодатчик на расстоянии $s_2 = 400$ мм от начала линейки.

13. Повторив пункты (4-8) настоящего руководства, измерьте время t_2 и запишите в таблицу № 3.

Таблица № 3. Результаты измерений времени при длине пути s_2 .

| № п/п | $s_2 = 400$ мм | | | |
|--------|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | t_{2i} , с | $ t_{2cp} - t_{2i} $, с | τ_{2i} , с | $ \tau_{2cp} - \tau_{2i} $, с |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

14. Повторив пункты 9, 10, 11, измерьте время τ_2 и запишите в таблицу № 3.

Обработка результатов измерений

1. Для каждой из измеренных величин найдите среднее арифметическое значение по формуле: $x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$, записывая их в

таблицы № 2, 3. (Под буквой x понимаются соответственно t_1, t_2, τ_1, τ_2 .)

2. Вычислите ускорения a_1 и a_2 по формуле (2.5), используя средние значения t_1, t_2 , для путей s_1 и s_2 соответственно.

3. Вычислите мгновенные скорости v_1 и v_2 , на основании средних значений интервалов времени τ_1, τ_2 , по формуле (2.8), на расстояниях s_1 и s_2 соответственно.

4*. Вычислите мгновенные скорости v'_1 и v'_2 на основании данных об ускорении тела по формуле $v' = a \cdot t$, используя средние значения t_1, t_2 , на расстояниях s_1 и s_2 соответственно. Сравните полученные значения со значениями, полученными в п. 3.

5. Покажите результаты расчетов преподавателю.

6. Найдите отклонения от среднего $\Delta x_i = |x_{cp} - x_i|$ для величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2, записывая, полученные значения в соответствующие ячейки таблицы № 2.

7. Вычислите случайные погрешности прямых измерений (средние отклонения от среднего) для величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2, по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = \frac{|x_{\text{cp}} - x_1| + |x_{\text{cp}} - x_2| + |x_{\text{cp}} - x_3| + |x_{\text{cp}} - x_4| + |x_{\text{cp}} - x_5|}{5}, \text{ записывая их в со-}$$

ответствующие ячейки последней строки таблицы № 2.

8. Вычислите полные погрешности прямых измерений для величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2, по формуле $\Delta x = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}}$, используя соответствующие значения приборной погрешности из таблицы № 1.

9. Округлите значения абсолютных погрешностей и результатов прямых измерений для величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2.

10. Вычислите относительные погрешности прямых измерений для величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2, по формуле $\delta x = \frac{\Delta x}{x_{\text{cp}}}$.

11. Запишите результаты прямых измерений величин t_1 и τ_1 , записанных в таблице № 2, в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата).

$$x = (x_{\text{cp}} \pm \Delta x) \text{ (единицы измерения)}.$$

12. Аналогичным образом обработайте результаты измерений времени движения тела при длине пути s_2 , выполнив пункты 6 – 11 для величин t_2 и τ_2 , записанных в таблице № 3.

13. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности для a_1 и v_1 , по формулам: а) $\delta a_1 = \delta s_1 + 2\delta t_1$ и $\Delta a_1 = a_1 \cdot \delta a_1$;

$$\text{б) } \delta v_1 = \delta l + \delta \tau_1 \text{ и } \Delta v_1 = v_1 \cdot \delta v_1.$$

14. Запишите результаты косвенных измерений величин a_1 и v_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата).

$$x = (x_{\text{cp}} \pm \Delta x) \text{ (единицы измерения)}.$$

15. Выполните пункты 13, 14 для величин a_2 и v_2 .

16. Изобразите на числовой оси в выбранном масштабе значения ускорений тела a_1 и a_2 с доверительными интервалами, а на другой числовой оси значения мгновенных скоростей тела v_1 и v_2 , определенные в п. 3, с доверительными интервалами (см. п. 1.2.1 введения).

17. Сравните полученные значения ускорений и мгновенных скоростей тела при различных пройденных путях (см. п. 3.5. введения).

18*. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности для мгновенных скоростей v'_1 и v'_2 , определенных в п. 4, по формулам: $\delta v' = \delta a + \delta t$; и $\Delta v' = v' \cdot \delta v'$.

19*. Запишите результаты косвенных измерений величин v'_1 и v'_2 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$x = (x_{\text{cp}} \pm \Delta x) \text{ (единицы измерения)}.$$

20*. Изобразите на числовой оси в выбранном масштабе значения мгновенных скоростей тела v_1 , v_2 , v'_1 и v'_2 , полученных различными способами, с доверительными интервалами (см. п. 1.2.1 введения).

21*. Сравните значения мгновенных скоростей тела, полученных различными способами (см. п. 3.5. введения).

22. На основании сравнения рассчитанных значений

- ускорений тела a_1 и a_2 ;

- мгновенных скоростей тела v_1 и v_2

сделайте выводы о согласовании полученных закономерностей с кинематическими уравнениями движения.

Контрольные вопросы и задания

1. Какими величинами характеризуется механическое движение?

2. Что такое «мгновенная скорость»? (приведите формулу)

3. Что такое «ускорение»?

4. Какое движение совершает соскальзывающий с наклонной плоскости груз?

5. Какие прямые измерения производят в этой работе? Какими измерительными приборами?

6. Как можно определить положение материальной точки в пространстве?

7. Напишите кинематические уравнения прямолинейного равнопеременного движения.

8. Напишите уравнение пути при равнопеременном движении в одном направлении. Всегда ли можно его применить при равнозамедленном движении?

9. Постройте качественно графики $v(t)$, $s(t)$ для равноускоренного и равнозамедленного движения.

10. Используя результаты работы, постройте примерные графики $v(t)$ и $s(t)$ для первого и второго опыта на одних и тех же осях координат.

11. На графиках, построенных по вопросу 10, покажите величины l и τ .

12. Объясните, почему значение v_2 оказалось больше значения v_1 . Как эта разница проявится на графиках $v(t)$ и $s(t)$?

Лабораторная работа № 3

Изучение свойств винтовой пружины

Литература:

Г.Я. Мякишев «Механика 10 кл», Дрофа, М., 2002 г., 5-ое изд
§3.8, 3.9, 3.12

Цель работы: 1) проверка закона Гука;

2) изучение зависимости жесткости пружины от ее длины и диаметра проволоки, из которой она изготовлена.

Теоретическое введение

При малых деформациях растяжения и сжатия для упругих тел справедлив закон Гука – возникающая сила упругости прямо пропорциональна деформации тела:

$$|F_{\text{упр}}| = k \cdot |x|, \quad (3.1)$$

где k – жесткость или коэффициент упругости, зависящий от материала тела, его формы и размеров и не зависящий от величины деформации, $|x|$ – значение деформации тела, возникающей вследствие приложения силы. Проверить справедливость этого закона можно, изучая силу упругости, возникающую при растяжении винтовой пружины. Пусть длина ненагруженной пружины l_0 , длина при растяжении l . Тогда $x = l - l_0$ (рис. 3.1).

Однако, при навивке пружины в ней возникает остаточная деформация (в ненагруженном состоянии витки пружины поджаты друг к другу с некоторой силой). Это приводит к тому, что, с одной стороны, пружина сохраняет свою форму, с другой стороны, проявляет упругие свойства только тогда, когда деформирующая сила больше силы, создаваемой остаточной деформацией. Поэтому для винтовой пружины закон Гука примет вид:

$$|F_{\text{упр}}| = F_{\text{ост}} + k \cdot |x|, \quad (3.2)$$

где $F_{\text{ост}}$ – сила, с которой сжаты витки вертикально подвешенной ненагруженной пружины.

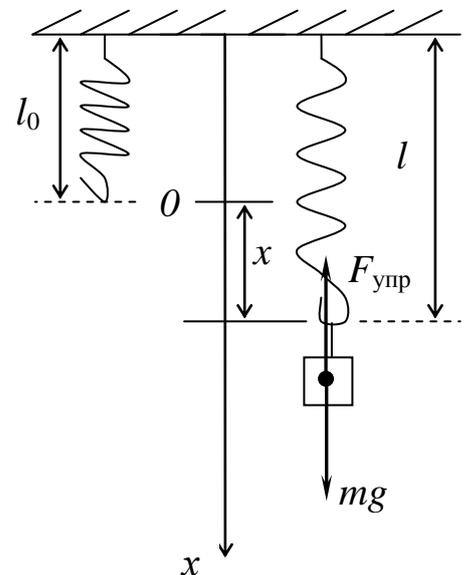


рис. 3.1

При подвешивании грузов различной массы к свободному концу пружины, закрепленной в держателе, изменяется удлинение пружины x и сила упругости (рис. 3.1). Из условия равновесия груза следует, что сила упругости равна силе тяжести грузов

$$F_{\text{упр}} = mg \quad (3.3)$$

Справедливость закона Гука для пружины можно проверить, построив график зависимости возникающей силы упругости $F_{\text{упр}}$, действующей на подвешенное к пружине тело, от x .

Графический метод является приближенным, но достаточно простым для обработки массива экспериментальных данных.

В соответствии с уравнением (3.2) зависимость силы упругости от значения деформации изображается прямой линией (рис. 3.2), которая пересекается с осью ординат в точке $F_{\text{ост}}$, соответствующей силе, создаваемой остаточной деформацией.

Среднее значение жесткости пружины k можно найти как тангенс угла наклона графика к оси абсцисс (по отношению катетов $(F_m - F_{\text{ост}})$ и x_0)

$$k_{\text{ср}} = \frac{F_m - F_{\text{ост}}}{x_0} = \text{tg}\alpha \quad (3.4)$$

Таким образом, можно опытным путем определить основные характеристики пружины $F_{\text{ост}}$ и k .

Описание установки

Схема установки представлена на рис.3.3.

Установка состоит из штатива (5), двух винтовых пружин (1) из проволоки разного диаметра и набора грузов (3) по 0,05 кг каждый.

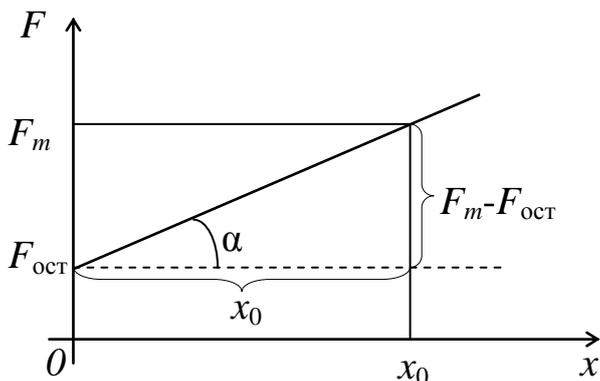


рис. 3.2 График зависимости силы упругости от величины деформации.

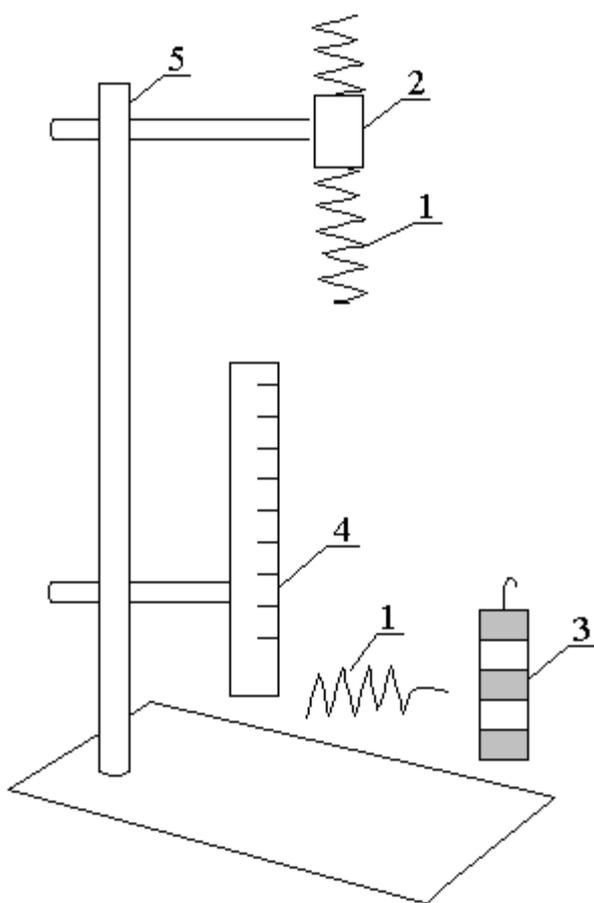


рис. 3.3

На штативе (5) закреплены держатель для пружины (2) и измерительная линейка (4).

Порядок выполнения работы

1. Получите допуск к работе с установкой.
2. Ознакомьтесь с установкой (визуально).
3. Заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|----------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | линейка | | | |
| 2. | штангенциркуль | | | |

4. Запишите в протокол данные установки: масса одного груза $m_0 = 0,050$ кг.
5. Определите (см. п. 2.2.2. введения) и запишите погрешность данных установки: $\Delta m_0 = \dots$.
6. Измерьте штангенциркулем диаметры проволок, из которых сделаны пружины. Запишите значения диаметров проволок в таблицу № 2 так, что: $d_1 > d_2$.

Таблица № 2. Результаты измерения удлинения пружины с изменением нагрузки.

| № п.п. | диаметр проволоки | | $d_1 = \dots$ мм | | | $d_2 = \dots$ мм |
|--------|-------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | число витков | | $N_1 = 12$ | $N_2 = 24$ | $N_3 = 36$ | $N_4 = 24$ |
| | $m, \text{ г}$ | $F, \text{ Н}$ | $x, \text{ мм}$ | $x, \text{ мм}$ | $x, \text{ мм}$ | $x, \text{ мм}$ |
| 1 | 250 | | | | | |
| 2 | 200 | | | | | |
| 3 | 150 | | | | | |
| 4 | 100 | | | | | |
| 5 | 50 | | | | | |

7. Вставьте сверху в держатель первый виток пружины с толщиной проволоки d_1 и сделайте 12 полных оборотов ($N_1 = 12$).
8. Закрепите линейку (4) в держателе штатива так, чтобы нулевое деление линейки находилось на уровне нижнего края ненагруженной пружины (отсчет по линейке должен идти вертикально вниз).
9. Подвесьте полный набор грузов, определите значение удлинения пружины x (в мм) и запишите в соответствующую графу таблицы № 2.
10. Снимая по одному грузу m_0 , определите и запишите в таблицу № 2 значения удлинений пружины, соответствующие каждой нагрузке.
11. Снимите грузы с пружины. Сделайте еще 12 полных оборотов так, чтобы в рабочем состоянии находилось 24 витка ($N_2 = 24$).
12. Повторите п. 8, 9, 10.
13. Снимите грузы с пружины. Сделайте еще 12 полных оборотов так, чтобы в рабочем состоянии находилось 36 витков ($N_3 = 36$).
14. Повторите п. 8, 9, 10.
15. Выньте из держателя пружину с толщиной проволоки d_1 .
16. Вставьте сверху в держатель пружину с толщиной проволоки d_2 и сделайте 24 полных оборотов ($N_4 = 24$).
17. Повторите п. 8, 9, 10.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте значения деформирующих сил F в основных единицах СИ по формуле (3.3) и запишите в таблицу № 2.

2. Рассчитайте погрешности деформирующих сил $\delta F \approx \delta m$; $\Delta F_{1-5} = F_{1-5} \delta F$; $\delta m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta m_0}{m_0}$ для всех пяти наборов грузов.

3. На листе миллиметровой бумаги формата А4 в выбранном масштабе по результатам измерений и расчетов нанесите 20 экспериментально полученных точек зависимости силы упругости от величины деформации в одной системе координат (см. п. 3.6. Введения «Построение графиков»). Для построения одной точки на графике необходимо в горизонтальном направлении с учетом масштаба отложить отрезок, соответствующий одному из измеренных значений удлинения пружины, а в вертикальном направлении отложить отрезок, соответствующий значению деформирующей силы, при котором наблюдалось это удлинение.

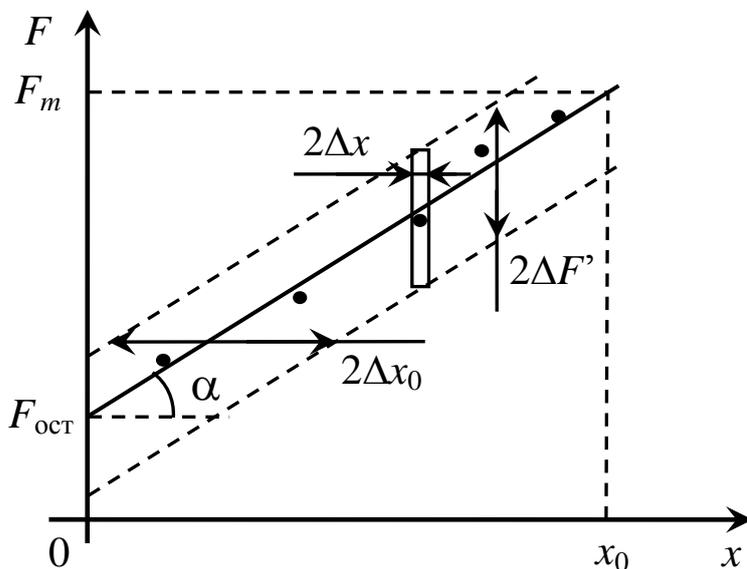


рис. 3.4

4. Работа с графиком.

а) Проведите оптимальную прямую через точки, соответствующие $N_1 = 12$ (см. п. 3.7. введения «Нахождение физических величин по графику»).

б) Для измерения номер 3 с $m = 150$ г соответствующего $N_1 = 12$ на графике изобразите реальный размер экспериментальной «точки» в виде прямоугольника. *Ширина* прямоугольника равна *удвоенной* погрешности измерения удлинения пружины Δx . Значение погрешности удлинения пружины Δx равно значению приборной погрешности (см. таб. 1 спецификация измерительных приборов).

в) *Высота* прямоугольника равна *удвоенной* погрешности измерения деформирующей силы ΔF_3 (см. рис. 3.4), вычисленной в п. 2.

г) Зная ширину и высоту, постройте прямоугольник на графике для точки номер 3 с $m = 150$ г соответствующей $N_1 = 12$.

д) Определите, что более удалено от оптимальной прямой, экспериментальные точки на графике, соответствующие $N_1 = 12$, или верхняя и нижняя границы построенного прямоугольника.

е) Ограничьте полосу, в которой находятся точки, прямыми, параллельными оптимальной прямой и проходящими через наиболее удаленные от оптимальной прямой точки (см. п. 3.7. введения «Нахождение физических величин по графику»).

5. На основе штриховых линий, параллельных оптимальной прямой, по графику определите значения погрешностей $\Delta F'$ и Δx_0 (см. рис. 3.4).

6. По графику определите $F_{\text{ост1}}$ (соответствующее $N_1 = 12$) и рассчитайте жесткость пружины k_1 (см. рис. 3.2 и формулу (3.4))

7. Рассчитайте погрешность определения жесткости пружины, соответствующей $N_1 = 12$, по формулам $\delta k_1 = \frac{\Delta F'}{F_m} + \frac{\Delta x_0}{x_0}$, $\Delta k_1 = k_1 \cdot \delta k_1$.

8. Запишите результат косвенного измерения значения k_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$k_1 = (k_{1cp} \pm \Delta k_1) \text{ (единицы измерения).}$$

9. Выполните п. 4 – 8 для остальных зависимостей и определите коэффициенты жесткости k_2 , k_3 и k_4 и их погрешности.

10. Сделайте выводы:

- о справедливости закона Гука;
- о зависимости жесткости пружины и силы $F_{ост}$ от длины пружины (сравнивая жесткости k_1 , k_2 и k_3);
- о зависимости жесткости пружины от диаметра ее проволоки (сравнивая жесткости k_2 и k_4).

Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. В каком случае деформация называется упругой?
3. Сформулируйте закон Гука.
4. Что такое жесткость (коэффициент упругости) винтовой пружины?
5. От чего зависит жесткость винтовой пружины?
6. В каких единицах измеряется коэффициент жесткости?
7. Чем объясняется появление первого слагаемого в уравнении (3.2)?
8. Почему жесткость уменьшается с увеличением длины пружины?
9. Как зависит жесткость пружины от диаметра проволоки, из которой она изготовлена? Почему?
10. Каков графический смысл коэффициента упругости?
11. Объясните вид графиков, полученных в работе, их сходства и различия.
12. Определите жесткость пружины, эквивалентной последовательному соединению трех одинаковых пружин жесткостью k_1 (с выводом).
13. Определите жесткость параллельного соединения трех одинаковых пружин жесткостью k_1 (с выводом).

Лабораторная работа № 4

Динамика движения тела по наклонной плоскости

Литература:

Г.Я. Мякишев «Механика 10 кл», Дрофа, М., 2002 г., 5-ое изд
§2.6, 3.13 – 3.15

Цель работы: определить коэффициент трения при скольжении тела по наклонной плоскости при различных углах наклона.

Теоретическое введение

Сила – мера механического действия других тел на данное тело. Это векторная физическая величина.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между силами, действующими на тело массой m , и ускорением этого тела: ускорение прямо пропорционально равнодействующей всех сил, действующих на тело, обратно пропорционально его массе и направлено по равнодействующей.

При скольжении одного тела по поверхности другого или при попытке вызвать такое скольжение возникает сила трения $F_{\text{тр}}$.

Сила трения скольжения направлена противоположно перемещению, ее модуль определяется соотношением $F_{\text{тр.ск.}} = \mu N$, здесь μ – коэффициент трения, N – сила нормальной реакции опоры.

Сила трения покоя $F_{\text{тр.покоя}}$ направлена в сторону, противоположную возможному скольжению и не имеет однозначной величины. Она может меняться в пределах от нуля до значения силы трения скольжения. В каждом конкретном случае ее величина такова, чтобы выполнялся II закон Ньютона.

Коэффициент трения μ зависит от сочетания материалов и качества поверхностей. Коэффициент трения не поддается теоретическому вычислению на основе представлений о строении поверхностей, а определяется экспериментально.

Рассмотрим задачу:

Пусть тело массой m соскальзывает с наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол α (рис. 4.1). Для определения коэффициента трения μ тела о плоскость используем II закон Ньютона в инерциальной системе отсчета, связанной с Землей.

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g}$$

или в проекциях на оси OX и OY :

$$OX : ma = -\mu N + 0 + mg \sin \alpha,$$

$$OY : 0 = 0 + N - mg \cos \alpha.$$

Решив эту систему уравнений, находим

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha - \frac{a}{g \cos \alpha}. \quad (4.1)$$

Из кинематических уравнений движения можно получить выражение для ускорения:

$$a = \frac{2s}{t^2}, \quad (4.2)$$

где s – путь, пройденным телом за время t , при $v_0 = 0$.

Подставляя (4.2) в (4.1), получим для коэффициента трения:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2s}{gt^2 \cdot \cos \alpha}, \quad (4.3)$$

где s , t и α определяются прямыми измерениями в ходе эксперимента.

Проводя измерения при разных углах α наклона плоскости, необходимо убедиться, что коэффициент трения не зависит от этого угла.

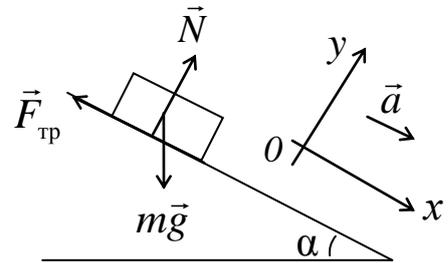


рис. 4.1

Описание установки

Установка состоит из наклонной плоскости с регулируемым углом наклона и регистрирующего устройства для измерения времени движения груза (рис. 4.2)

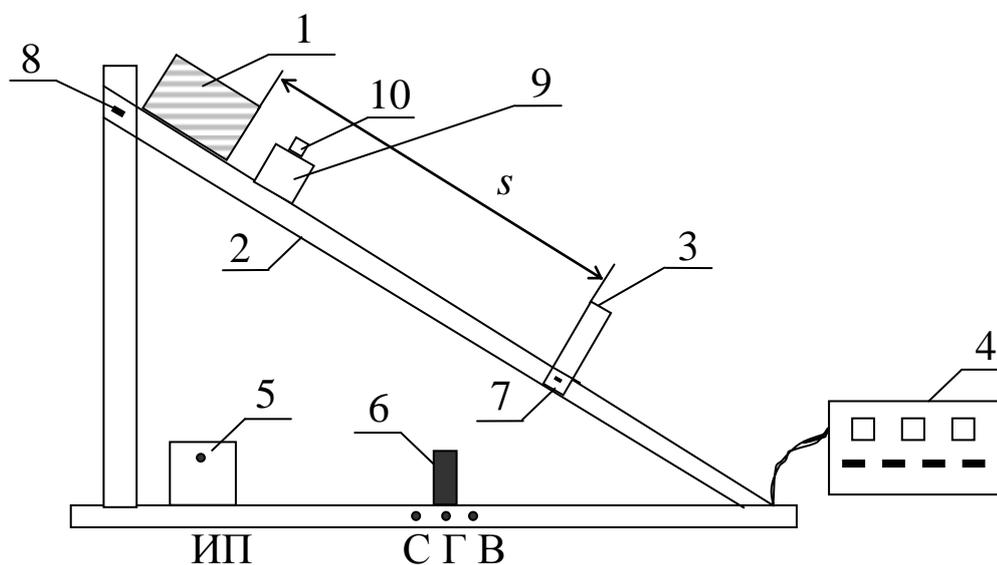


рис. 4.2

1. Электромагнит
2. Линейка
3. Фотодатчик
4. Секундомер
5. Выключатель источника питания
6. Переключатель режимов работы
7. Винт крепления фотодатчика
8. Винт крепления линейки к стойке
9. Груз (движущееся тело)
10. «Флажок» груза

Тело, движущееся по наклонной плоскости, представляет собой груз (9) с «флажком» (10) (рис. 4.2). Когда переключатель режимов работы (6) установлен в положении «Готов» (Г), электромагнит (1) удерживает груз в верхнем положении. При переводе переключателя (6) в положение «время» (В) происходит одновременное отключение магнита и включение секундомера. Секундомер выключается в момент прерывания светового луча фотодатчика (3) «флажком» (10) движущегося тела. Поэтому цифровой индикатор секундомера покажет время t , за которое тело прошло путь s .

Порядок выполнения работы

Вариант 1. Использование измерительной системы Vernier

1. Визуально ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу № 1.

Таблица №1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|---|------------------|--------------|-----------------------|
| 1 | шкала линейки | | | |
| 2 | встроенный секундомер компьютера LabQuest | — | 10 мкс | 10 мкс |
| 3 | шкала измерений углов наклона | | | |

Запишите в протокол данные установки:

углы наклона $\alpha_1 = 35^\circ$, $\Delta\alpha_1 =$, $\delta\alpha_1 = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} =$

$\alpha_2 = 25^\circ$, $\Delta\alpha_2 =$, $\delta\alpha_2 =$

длина пути тела $s = 400$ мм, $\Delta s =$, $\delta s =$

Погрешности $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$, Δs определите, руководствуясь разделом Введение (см. п. 4 стр. 15).

2. Установите координату правого (нижнего) фотодатчика, соответствующей длине пути тела 400 мм (за дополнительными указаниями обратитесь к учителю).

3. С помощью винта (8) зафиксируйте угол наклона линейки (2) $\alpha_1 = 35^\circ$.

4. Включите компьютер LabQuest.

5. Перейдите в режим табличного отображения данных нажатием соответствующей кнопки на экране.

6. Переверните переключатель режимов работы (6) в положение «готов» (Г), после чего установите груз у начала линейки (2) вплотную к электромагниту (1).

7. Нажмите кнопку «пуск» на компьютере (кнопка с символом  на клавиатуре либо в нижнем левом углу экрана).

8. Переведите переключатель (6) в положение «время» (В).
9. После прохождения тележкой второго фотодатчика, остановите ее.
10. Остановите запись данных, нажав кнопку «пуск».
11. Запишите показание секундомера из *третьей* строки таблицы на экране LabQuest в графу t_{1i} таблицы № 2.

Примечание. В таблице на экране LabQuest времени движения тележки, затраченным на прохождение пути s будет соответствовать показание секундомера в момент закрытия (**blocked**) второго (нижнего) фотодатчика. Это значение будет выведено в *третьей* строке таблицы.

Таблица №2. Результаты измерений времени движения груза при двух углах наклона плоскости α_1 и α_2 .

| $s = 400$ мм | | | | |
|--------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| № п.п. | $\alpha_1 = 35^\circ$ | | $\alpha_2 = 25^\circ$ | |
| | $t_{1i}, \text{с}$ | $ t_{1\text{сп}} - t_{1i} , \text{с}$ | $t_{2i}, \text{с}$ | $ t_{2\text{сп}} - t_{1i} $ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

12. Повторите пункты 6-11 пять раз.
13. Зафиксируйте угол $\alpha_2 = 25^\circ$.
14. Повторите пункты 6-11 пять раз для измерения отрезков времени t_2 , запишите полученные значения в таблицу № 2.

Вариант 2. Использование секундомера СТЦ-1

1. Визуально ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу № 1.

Таблица №1. Спецификация измерительных приборов.

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|-----------|-------------------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1 | шкала линейки | | | |
| 2 | секундомер | | | |
| 3 | шкала измерений углов наклона | | | |

Запишите в протокол данные установки:

углы наклона $\alpha_1 = 35^\circ$, $\Delta\alpha_1 =$, $\delta\alpha_1 = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} =$

$\alpha_2 = 25^\circ$, $\Delta\alpha_2 =$, $\delta\alpha_2 =$

длина пути тела $s = 400$ мм, $\Delta s =$, $\delta s =$

Погрешности $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$, Δs определите, руководствуясь разделом Введение (см. п. 4 стр. 15).

2. С помощью винта (7) установите фотодатчик на расстоянии $s = 400$ мм от начала линейки (2). Нажмите клавиши «сеть» секундомера (4) и источника питания (5).
3. С помощью винта (8) зафиксируйте угол наклона линейки (2) $\alpha_1 = 35^\circ$.
4. Нажмите клавишу «уст.0» на секундомере.
5. Измерьте время t_1 прохождения грузом пути s . Для этого переведите переключатель режимов работы (6) из положения «Готов» (Г) в положение «Время» (В). Запишите показания секундомера в таблицу № 2.
6. Повторите измерения п. 4, 5 пять раз.

Таблица №2. Результаты измерений времени движения груза при двух углах наклона плоскости α_1 и α_2 .

| $s = 400$ мм | | | | |
|--------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| № п.п. | $\alpha_1 = 35^\circ$ | | $\alpha_2 = 25^\circ$ | |
| | $t_{1i}, \text{с}$ | $ t_{1\text{cp}} - t_{1i} , \text{с}$ | $t_{2i}, \text{с}$ | $ t_{2\text{cp}} - t_{1i} $ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

6. Зафиксируйте угол $\alpha_2 = 25^\circ$ и повторите п. 4 – 6.

Обработка результатов измерений

1. Для каждой из измеренных величин найдите среднее арифметическое значение по формуле: $x_{\text{cp}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$, записывая их в таблицу № 2. (Под буквой x понимаются соответственно t_1 и t_2 .)

2. Вычислите значения коэффициентов трения скольжения μ_1 и μ_2 по формуле (4.3), используя средние значения t_1 и t_2 . Покажите результаты преподавателю.

3. Найдите отклонения от среднего $\Delta x_i = |x_{\text{cp}} - x_i|$ для величины t_1 , записанной в таблице № 2, записывая, полученные значения в соответствующие ячейки таблицы № 2.

4. Вычислите случайную погрешность прямого измерения (среднее отклонение от среднего) для величины t_1 , записанной в таблице № 2, по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = \frac{|x_{\text{cp}} - x_1| + |x_{\text{cp}} - x_2| + |x_{\text{cp}} - x_3| + |x_{\text{cp}} - x_4| + |x_{\text{cp}} - x_5|}{5},$$
 записав ее в соот-

ветствующую ячейку последней строки таблицы № 2.

5. Вычислите полную погрешность прямого измерения для величины t_1 по формуле $\Delta x = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}}$, используя соответствующее значение приборной погрешности из таблицы № 1.

6. Округлите значение абсолютной погрешности и результата прямого измерения для величины t_1 (см. стр. 15 Запись результата).

7. Вычислите относительную погрешность прямого измерения для величины t_1 по формуле $\delta x = \frac{\Delta x}{x_{\text{cp}}}$.

8. Запишите результат прямого измерения величины t_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$t_1 = (t_{1\text{cp}} \pm \Delta t_1) \text{ (единицы измерения)}.$$

9. Аналогичным образом обработайте результаты измерений времени движения тела при угле наклона α_2 , выполнив пункты 3 – 8 для величины t_2 .

10. Вычислите вспомогательную величину по формуле $A_1 = \frac{2s}{gt_{1\text{cp}}^2 \cos \alpha_1}$.

11. Вычислите относительную и абсолютную погрешности величины A_1 по формулам

$$\delta A_1 = \delta s + 2\delta t_1; \quad \Delta A_1 = A_1 \cdot \delta A_1.$$

12. Выразите погрешность измерения угла наклона плоскости $\Delta\alpha$ в радианной мере углов. (Для перевода значения угла из градусной меры в радианную можно воспользоваться формулой

$$\Delta\alpha \text{ (радиан)} = \frac{\Delta\alpha^\circ}{180} \cdot 3,14 = \Delta\alpha^\circ \cdot 0,0174).$$

13. Вычислите абсолютную погрешность измерения коэффициента трения скольжения $\Delta\mu_1$ по формуле

$$\Delta\mu_1 = (1 + \operatorname{tg}^2\alpha_1) \cdot \Delta\alpha + \Delta A_1.$$

14. Округлите значение абсолютной погрешности, полученной в п. 14 (см. стр. 15 Запись результата).

15. Запишите результат косвенного измерения величины μ_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$\mu_1 = \mu_{1\text{cp}} \pm \Delta\mu_1$$

16. Выполните пункты 10 – 15 для расчета погрешности косвенного измерения величины μ_2 .

17. Изобразите на числовой оси в соответствующем масштабе значения коэффициентов трения скольжения μ_1 и μ_2 с доверительными интервалами (см. п. 1.2.1 введения).

18. Сравните значения коэффициентов трения скольжения, измеренных при различных углах наклона плоскости (см. п. 3.5. введения).

19. Сделайте вывод о зависимости коэффициента трения скольжения от угла наклона плоскости.

Контрольные вопросы и задания

1. От чего зависит сила трения скольжения?
2. От чего зависит коэффициент трения?
3. Каково направление силы трения?
4. Какие прямые измерения производят в этой работе? Какими измерительными приборами?
5. Сформулируйте II закон Ньютона.
6. Укажите силы, действующие на тело, соскальзывающее с наклонной плоскости. Каков здесь характер движения тела?
7. Из каких соображений определялось ускорение тела в данной работе? Выведите расчетную формулу.
8. Что такое сила трения покоя? Как ее можно найти?

9. Выведите расчетную формулу для определения μ по результатам прямых измерений в работе.
10. При каких углах наклона плоскости α тело не будет соскальзывать с нее?
11. Как найти силу трения тела о наклонную плоскость, если оно покоится на ней?
12. Как изменятся сила трения и коэффициент трения, если увеличить массу тела?
13. Как изменятся сила трения и коэффициент трения, если уменьшить (увеличить) поверхность соприкосновения тела с наклонной плоскостью?
14. Постройте график зависимости силы трения от угла α наклона плоскости к горизонту при изменении α от 0° до 90° .

Теоретическое введение к лабораторным работам № 5 и № 6

Законы сохранения в механике

Законы сохранения импульса и энергии являются фундаментальными законами природы. Напомним основные определения и формулировки.

1. *Импульсом тела* (количеством движения) называется векторная величина $\vec{p} = m\vec{v}$, где m – масса тела, \vec{v} – скорость тела. *Импульсом системы тел* называется векторная сумма импульсов тел, входящих в систему: $\vec{P}_{\text{сист}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n$.

2. Силы, с которыми тела системы действуют друг на друга, называются *внутренними* (\vec{f}).

3. Силы, действующие на тела системы со стороны других тел, не включенных в систему, называются *внешними* (\vec{F}).

4. Систему, на тела которой не действуют внешние силы, т.е. они взаимодействуют только между собой, называют *замкнутой*.

5. Для замкнутой системы, (состоящей из любого количества тел) справедлив *закон сохранения импульса (З.С.И.)*: «импульс замкнутой системы остается постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой».

6. В реальной задаче практически невозможно найти замкнутую систему тел. Законом сохранения импульса можно воспользоваться, описывая поведение *незамкнутых* систем тел в следующих случаях:

а) внешние силы, действующие на любое тело системы, уравниваются, т.е. если $\sum \vec{F}_{i\text{внеш}} = 0$, то $\vec{P}_{\text{сист}} = \text{const}$.

б) если при взаимодействии тел незамкнутой системы между собой силы внутренние много больше внешних и длительность такого взаимодействия τ мала, т.е. если $\tau \rightarrow 0$, а $f_{\text{внутр}} \gg F_{\text{внешн}}$, то $\vec{P}_{\text{сист}} = \text{const}$. Обычно эти условия выполняются при ударе, взрыве.

в) проекция суммы внешних сил на какую-либо ось равна нулю (например $\sum F_{xi} = 0$), тогда проекция импульса системы тел на эту ось сохраняется: $\sum P_x = \text{const}$. (При этом вектор $\vec{P}_{\text{сист}}$ может не сохраняться!)

7. *Механическая энергия* системы тел – это сумма кинетических энергий тел и потенциальных энергий их взаимодействия

$$W_{\text{мех}} = \sum W_{\text{кин}} + \sum W_{\text{пот}}.$$

Потенциальная энергия тела в гравитационном поле Земли $W_{\text{пот}} = mgh$, где h – высота над уровнем, принятым за начало отсчета, т.е. где $W_{\text{пот}} = 0$. Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v

$$W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}.$$

8. Мерой изменения энергии системы служит *работа силы* $A(F) = F\Delta r \cos(\vec{F}\hat{\Delta r})$, где $\Delta \vec{r}$ – вектор перемещения точки приложения силы \vec{F} .

9. *Теорема об изменении кинетической энергии*: изменение кинетической энергии тела (системы тел) равно суммарной работе всех сил, действовавших на тела системы: $\Delta W_{\text{кин}} = \sum A(F)$.

10. *Теорема об изменении механической энергии*: изменение полной механической энергии системы тел равно работе внешних сил и внутренних неконсервативных сил (трения, неупругой деформации, мышечные и т.д.)

$$\Delta W_{\text{мех}} = A(F_{\text{внеш}}) + A(F_{\text{внутр}}^{\text{неконс}}).$$

11. *Закон сохранения механической энергии*:

Механическая энергия системы тел сохраняется, если суммарная работа внешних сил и внутренних неконсервативных равна нулю.

$$W_{\text{мех}} = \text{const}, \Delta W_{\text{мех}} = \Delta W_{\text{кинет}} + \Delta W_{\text{пот}} = 0,$$

$$\text{если } A(F_{\text{внеш}}) + A(F_{\text{внутр}}^{\text{неконс}}) = 0.$$

В частном случае, механическая энергия замкнутой консервативной системы сохраняется.

Лабораторная работа №5

Изучение закона сохранения импульса

Литература:

Г.Я. Мякишев «Механика 10 кл», Дрофа, М., 2002 г., 5-ое изд
§5.1 – 5.6

Цель работы: проверка выполнения закона сохранения импульса на модельной системе пушка – снаряд.

Теоретическое введение

Закон сохранения импульса и условия его применимости сформулированы в общем теоретическом введении к лабораторным работам № 5 и № 6.

Рассмотрим задачу: из пушки массой m_1 , стоящей на гладкой горизонтальной поверхности, в горизонтальном направлении вылетает («выстреливается») снаряд массой m_2 , в результате чего пушка откатывается в сторону, противоположную направлению движения снаряда (рис. 5.1).

В процессе «выстрела» внешние силы (сила тяжести и сила реакции опоры) уравниваются друг друга. Следовательно, для описания поведения этой системы можно воспользоваться законом сохранения импульса в незамкнутых системах:

если $\sum \vec{F}_{i\text{внешн}} = 0$, то $\vec{P}_{\text{сист}} = \text{const}$ (см. общее теоретическое введение к л.р. № 5 и № 6 пункт 6а).

Тогда импульсы системы до и после выстрела равны:

$$\vec{P}_{\text{сист.до}} = \vec{P}_{\text{сист.после}}$$

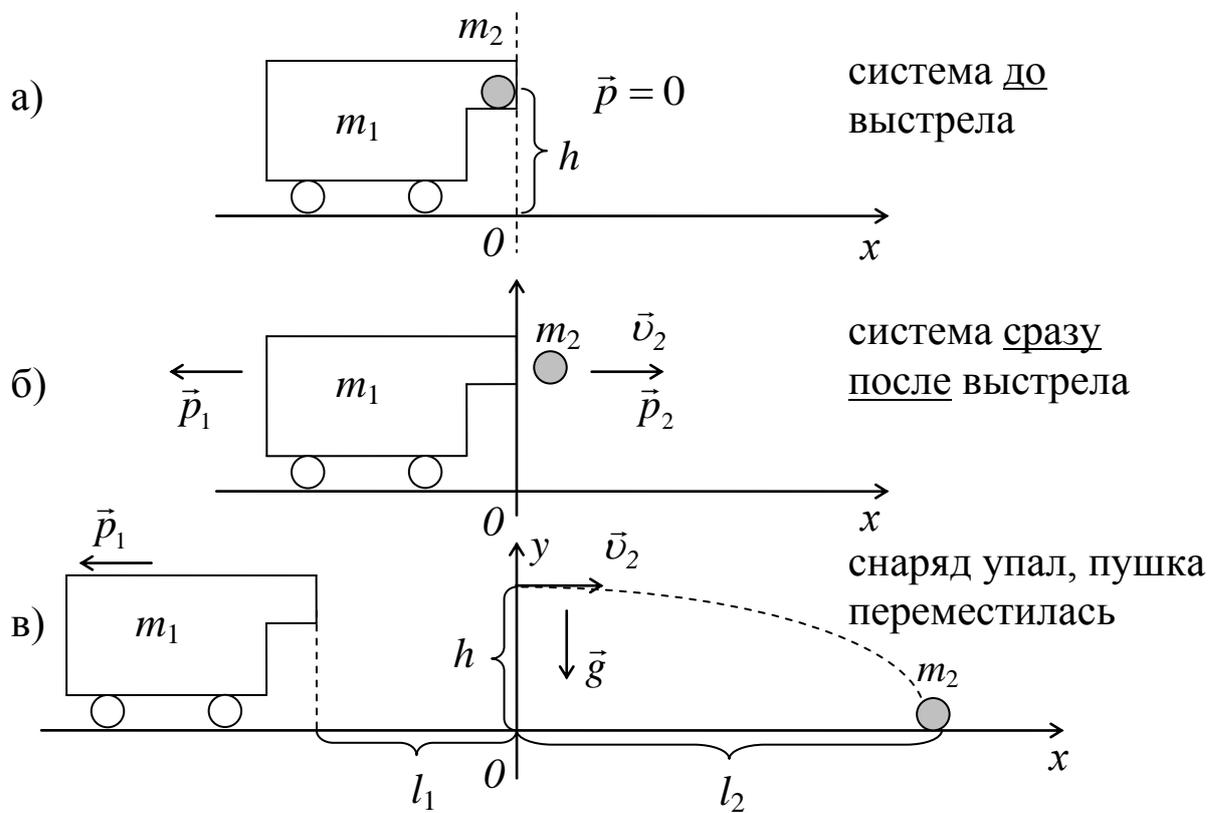


рис. 5.1

$$\vec{P}_{\text{сист. до}} = 0; \vec{P}_{\text{сист. после}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

$$0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \quad (5.1)$$

Проецируя на горизонтальную ось уравнение (5.1), получим:

$$p_1 = p_2. \quad (5.2)$$

Установив (с учетом погрешности эксперимента) справедливость равенства (5.2), мы можем сделать вывод о выполнении закона сохранения импульса системы в данном эксперименте.

Для определения величин импульсов пушки и снаряда необходимо найти скорости тел сразу после отделения снаряда от пушки.

Скорость пушки v_1 определим из следующих соображений: после выстрела пушка приобретает скорость v_1 и за малое время t_1 проходит малое расстояние l_1 (см. рис. 5.1 в). Считая движение пушки равномерным (в силу малости l_1 и t_1 и силы трения качения), находим

$$v_1 = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_1}{t_1}. \quad (5.3)$$

Таким образом, импульс пушки сразу после выстрела:

$$p_1 = m_1 v_1 = m_1 \frac{l_1}{t_1}. \quad (5.4)$$

Чтобы найти скорость снаряда v_2 , применим уравнения кинематики. После выстрела снаряд движется с постоянным ускорением $\vec{a} = \vec{g}$, следовательно, его положение в любой момент определяется радиус-

вектором $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$, где $\vec{v}_0 = \vec{v}_2$. Вводим систему отсчета: $t = 0$ в момент отделения снаряда от пушки, $x = 0$; $y = 0$ в точке под местом «старта» снаряда, оси ox и oy показаны на рис. 5.1 в. Тогда уравнения движения снаряда

$$x(t) = v_2 t, \quad (5.5)$$

$$y(t) = h - \frac{g t^2}{2}. \quad (5.6)$$

$$\text{В момент падения, при } t = t_2 \quad x = l_2, \quad y = 0. \quad (5.7)$$

Решение уравнений (5.5) и (5.6) с условием (5.7) дают формулу для расчета скорости снаряда

$$v_2 = l_2 \cdot \sqrt{\frac{g}{2h}}. \quad (5.8)$$

Следовательно, импульс снаряда в момент отделения от пушки

$$p_2 = m_2 v_2 = m_2 l_2 \sqrt{\frac{g}{2h}}, \quad (5.9),$$

где h – высота, l_2 – горизонтальная дальность полета.

Описание установки

Схема установки представлена на рис. 5.2.

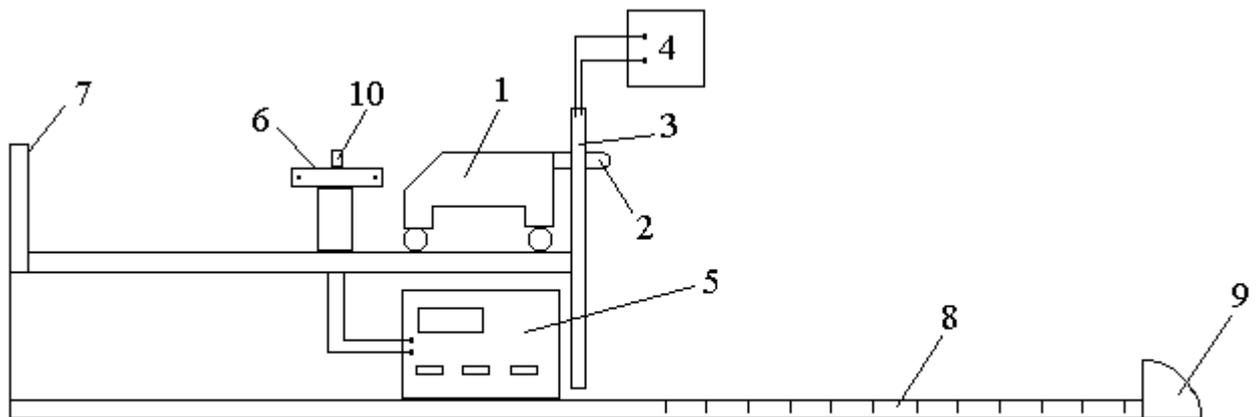


рис. 5.2

Основными элементами установки являются пружинная пушка (1) и снаряд (2). Пушка жестко закреплена на тележке, а тележка может перемещаться с малым трением по горизонтальным направляющим. Ствольная часть пушки выполнена в виде цилиндрического стержня, на

который надета пружина. В начальном положении снаряд и пушка со сжатой пружиной удерживаются электромагнитом (3), питание которого обеспечивается источником тока (4). Управляющим и измерительным блоком служит миллисекундомер-таймер (5) с цифровой индикацией времени. При переключении тумблера «Пуск» (10) отключается питание обмотки электромагнита, пружина распрямляется и взаимодействующие тела пушка – снаряд приобретают скорости v_1 и v_2 соответственно. Сразу после полного разжатия пружины автоматически включается счет времени, а после прохождения малого фиксированного расстояния l_1 счет времени заканчивается. Начало и окончание счета времени t_1 осуществляется с помощью магнито-контактных датчиков, размещенных на рамке (6). Для ограничения движения тележки по рельсам предусмотрен пружинный захват (7). Снаряд после выстрела падает с высоты h на горизонтальную приемную площадку. На площадке имеется шкала (8), позволяющая определить дальность полета снаряда l_2 . На краю приемной площадки расположена ловушка (9), предназначенная для гашения скорости снаряда после его падения.

Порядок выполнения работы

1. Получите допуск к работе с установкой.
2. Ознакомьтесь с установкой (визуально).
3. Заполните таблицу № 1.

Таблица №1. Спецификация измерительных приборов

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|----------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | | | | |
| 2. | | | | |

4. Запишите в протокол данные установки:

$$m_1 = \dots\dots\dots; \quad h = \dots\dots\dots$$

$$m_2 = \dots\dots\dots; \quad l_1 = \dots\dots\dots$$

5. Определите (см. п. 2.2.2. введения) и запишите погрешности округления данных установки:

$$\Delta m_1 = \dots\dots\dots; \quad \Delta h = \dots\dots\dots;$$

$$\Delta m_2 = \dots\dots\dots; \quad \Delta l_1 = \dots\dots\dots;$$

$$\delta m_1 = \frac{\Delta m_1}{m_1} = \dots\dots\dots; \quad \delta h = \frac{\Delta h}{h} = \dots\dots\dots;$$

$$\delta m_2 = \dots\dots\dots; \quad \delta l_1 = \dots\dots\dots$$

6. В предполагаемом месте падения снаряда на шкале (8) укрепите с помощью фиксатора чистый лист бумаги, поверх которого наложите лист копировальной бумаги.
7. Нажмите клавишу «сеть» на лицевой панели миллисекундомера (5).
8. Переведите тумблер «Пуск» (10) в рабочее положение (таким образом включается электромагнит).
9. Подгоните пушку к электромагниту, наденьте снаряд на стержень и, сжав до упора пружину, зафиксируйте систему в исходном положении. Убедитесь, что все колеса тележки находятся в направляющих.
10. Нажмите клавишу «уст.0» на миллисекундомере (5). На панели цифровой индикации должны появиться нули.
11. Тумблером «Пуск» (10) отключите электромагнит. Происходит «выстрел».
12. После прохождения пушкой магнитных датчиков (6) запишите в таблицу № 2 время движения пушки t_1 .

Таблица №2. Результаты измерения времени движения пушки и дальности полета снаряда

| № п.п. | t_{1i} , с | $ t_{1cp} - t_{1i} $, с | l_{2i} , см | $ l_{2cp} - l_{2i} $, см |
|--------|--------------|--------------------------|---------------|---------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

13. По следу от копировальной бумаги на листе чистой бумаги, образовавшемся на месте падения снаряда, с помощью шкалы (8) определите l_2 – горизонтальную дальность полета и запишите ее в таблицу № 2. Зачеркните полученный след.
14. Вновь закройте бумагу копиркой и закрепите фиксатором.
15. Повторите п. 8-14 пять раз.

Обработка результатов измерений

1. Для каждой из измеренных величин найдите среднее арифметическое значение по формуле: $x_{\text{cp}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$, записывая их в таблицу № 2. (Под буквой x понимаются соответственно t_1 и l_2 .)

2. Вычислите скорости пушки и снаряда по формулам (5.3) и (5.8), используя средние значения t_1 и l_2 .

3. Вычислите модули импульсов пушки и снаряда по формулам $p_1 = m_1 v_1$, $p_2 = m_2 v_2$. Покажите преподавателю полученные значения.

4. Найдите отклонения от среднего $\Delta x_i = |x_{\text{cp}} - x_i|$ для величины t_1 , записанной в таблице № 2, записывая полученные значения в соответствующие ячейки таблицы № 2.

5. Вычислите случайную погрешность прямого измерения (среднее отклонение от среднего) для величины t_1 , записанной в таблице № 2, по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = \frac{|x_{\text{cp}} - x_1| + |x_{\text{cp}} - x_2| + |x_{\text{cp}} - x_3| + |x_{\text{cp}} - x_4| + |x_{\text{cp}} - x_5|}{5},$$
 записав ее в соот-

ветствующую ячейку последней строки таблицы № 2.

6. Вычислите полную погрешность прямого измерения для величины t_1 , по формуле $\Delta x = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}}$, используя соответствующее значение приборной погрешности из таблицы № 1.

7. Округлите значения абсолютных погрешностей и результатов прямых измерений для величины t_1 (см. стр. 15 Запись результата).

8. Вычислите относительную погрешность прямого измерения для величины t_1 по формуле $\delta x = \frac{\Delta x}{x_{\text{cp}}}$.

9. Запишите результат прямого измерения величины t_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$t_1 = (t_{1\text{cp}} \pm \Delta t_1) \text{ (единицы измерения)}.$$

10. Аналогичным образом обработайте результаты измерений горизонтальной дальности полета снаряда, выполнив пункты 4 – 9 для величины l_2 .

11. Рассчитайте относительную погрешность результата измерения импульса пушки по формуле: $\delta p_1 = \delta m_1 + \delta l_1 + \delta t_1$.

12. Рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения импульса пушки по формуле: $\Delta p_1 = p_1 \cdot \delta p_1$.

13. Округлите значение абсолютной погрешности, полученной в п. 11 (см. стр. 15 Запись результата).

14. Запишите результат косвенного измерения импульса пушки в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$p_1 = (p_{1cp} \pm \Delta p_1) \text{ (единицы измерения).}$$

15. Рассчитайте относительную погрешность результата измерения импульса снаряда по формуле: $\delta p_2 = \delta m_2 + \delta l_2 + \frac{1}{2} \delta h$.

16. Рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения импульса снаряда по формуле: $\Delta p_2 = p_2 \cdot \delta p_2$.

17. Округлите значение абсолютной погрешности, полученной в п. 15 (см. стр. 15 Запись результата).

18. Запишите результат косвенного измерения импульса снаряда в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$p_2 = (p_{2cp} \pm \Delta p_2) \text{ (единицы измерения).}$$

19. Изобразите на числовой оси в соответствующем масштабе значений импульсов пушки и снаряда с доверительными интервалами (см. п. 1.2.1 введения).

20. Сравните значения импульсов пушки и снаряда (см. п. 3.5. введения).

21. Сделайте вывод о выполнении закона сохранения импульса в модельной системе пушка-снаряд.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается цель данной работы?
2. Что такое импульс тела, системы тел?
3. Какая система тел рассматривается в этой лабораторной работе?
4. Что измеряется непосредственно для нахождения скорости пушки?
5. Какую скорость снаряда надо найти?
6. Какие величины для этого измеряются в ходе работы?
7. Сформулируйте II закон Ньютона в терминах импульсов (с выводом).
8. Как формулируется закон сохранения импульса?
9. При каких условиях применим закон сохранения импульса?

10. Как и в какой форме можно использовать З.С.И. в незамкнутых системах?
11. Можно ли применить З.С.И., если выстрел происходит под углом к горизонту?
12. Как в случае выстрела под углом α к горизонту найти скорость пушки, если известна скорость снаряда?
13. Вывести расчетную формулу для определения скорости снаряда после выстрела.
14. Как определяется по данным эксперимента скорость пушки после выстрела?
15. При каком соотношении между величинами p_1 и p_2 и их погрешностями можно считать, что З.С.И. выполняется в этом эксперименте?

Лабораторная работа № 6

Изучение законов сохранения в механике на модели копра

Литература:

Г.Я. Мякишев «Механика 10 кл», Дрофа, М., 2002 г., 5-ое изд
§5.1 – 5.6, 6.4 – 6.11

Цель работы: определение средней силы сопротивления грунта при забивке сваи на механической модели и выявление зависимости этой силы от высоты падения груза и свойств грунта.

Теоретическое введение

Для расчета силы сопротивления грунта на модели копра необходимо применить законы сохранения импульса и механической энергии, а также теорему об изменении кинетической энергии (теорема 1, п. 9) (см. общее теоретическое введение к л.р. № 5 и № 6).

Рассмотрим задачу: сваю массой m_2 забивают в грунт с помощью груза массой m_1 , падающего с высоты H (см. рис. 6.1).

Процесс следует рассматривать состоящим из трех последовательных событий:

1-е событие. Падение груза m_1 с высоты H (переход из состояния, изображенного рис. 6.1 а в состояние рис. 6.1 б). В системе тел груз + Земля действует только сила тяготения (консервативная), следовательно, механическая энергия сохраняется:

$$\Delta W_{\text{кин}} + \Delta W_{\text{пот}} = 0, \quad (6.1)$$

$$\Delta W_{\text{кин}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} - 0, \quad (6.2)$$

$$\Delta W_{\text{пот}} = -m_1 g H \quad (6.3)$$

(она уменьшается).

Подставив (6.2) и (6.3) в (6.1), получаем

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} - m_1 g H = 0,$$

откуда скорость груза перед ударом о сваю:

$$v_1 = \sqrt{2gH} \quad (6.4).$$

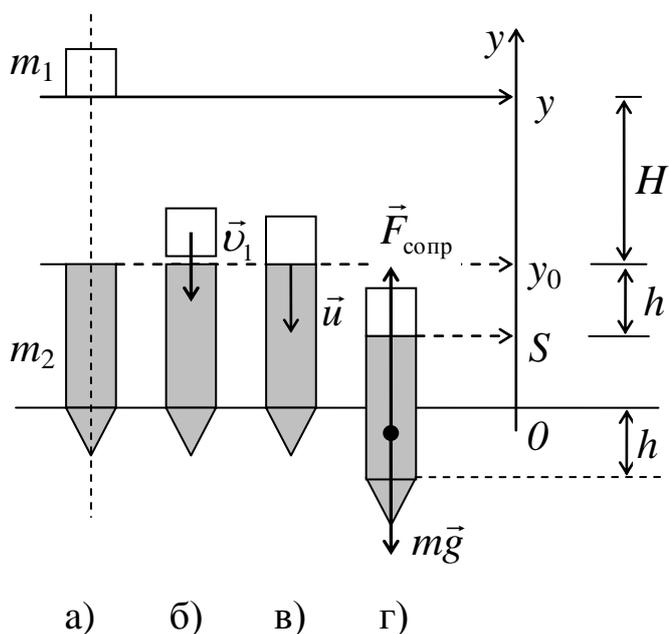


рис. 6.1

Тогда

$$\vec{P}_{\text{сист.до}} = \vec{P}_{\text{сист.после}},$$

где $\vec{P}_{\text{сист.до}} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{0}$; $\vec{P}_{\text{сист.после}} = (m_1 + m_2) \vec{u}$,

где \vec{u} – скорость системы (свая-груз) после абсолютно неупругого удара.

2-е событие. Абсолютно неупругий удар груза m_1 о сваю m_2 , в ходе которого свая еще не успевает сместиться из своего положения (от рис. 6.1 б к рис. 6.1 в).

Для системы тел груз + свая можно применить закон сохранения импульса, считая, что сила удара (внутренняя) много больше сил тяжести и силы сопротивления грунта, время соударения мало.

$m_1 \vec{v}_1 = (m_1 + m_2) \vec{u}$, откуда

$$u = v_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (6.5).$$

3-е событие. Перемещение системы свая-груз до остановки (от рис. 6.1 в к рис. 6.1 г) на расстояние h . Применим теорему об изменении кинетической энергии:

$$\Delta W_{\text{кин}} = A(mg) + A(F_{\text{сопр}}), \quad (6.6)$$

$$\Delta W_{\text{кин}} = 0 - \frac{(m_1 + m_2)u^2}{2}, \quad (6.7)$$

$$A(mg) = (m_1 + m_2)g \cdot h \cos 0^\circ, \quad (6.8)$$

$$A(F_{\text{сопр}}) = F_{\text{сопр}} \cdot h \cos 180^\circ. \quad (6.9)$$

Подставив (6.7), (6.8), (6.9) в (6.6), получаем

$$\frac{(m_1 + m_2)u^2}{2} = h(F - (m_1 + m_2)g),$$

откуда находим силу сопротивления грунта:

$$F_{\text{сопр}} = \left[\frac{m_1^2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{H}{h} + (m_1 + m_2) \right] g. \quad (6.10).$$

В формуле (6.10): m_1 и m_2 – данные установки, величины H (высоту падения груза) и h (глубину погружения сваи) можно найти, измерив координаты *нижней* точки груза и *верхней* точки сваи до и после эксперимента (рис. 6.1):

$$H = y - y_0, \quad (6.11)$$

$$h = y_0 - S, \quad (6.12)$$

где y – координата *нижней* точки **груза** до эксперимента, y_0 – координата *верхней* точки **сваи** до эксперимента, S – координата *верхней* точки **сваи** после эксперимента.

Очевидно, что сила $F_{\text{сопр}}$ не зависит от высоты, с которой падает груз (с увеличением H , увеличивается h), а зависит только от свойств грунта.

Описание установки

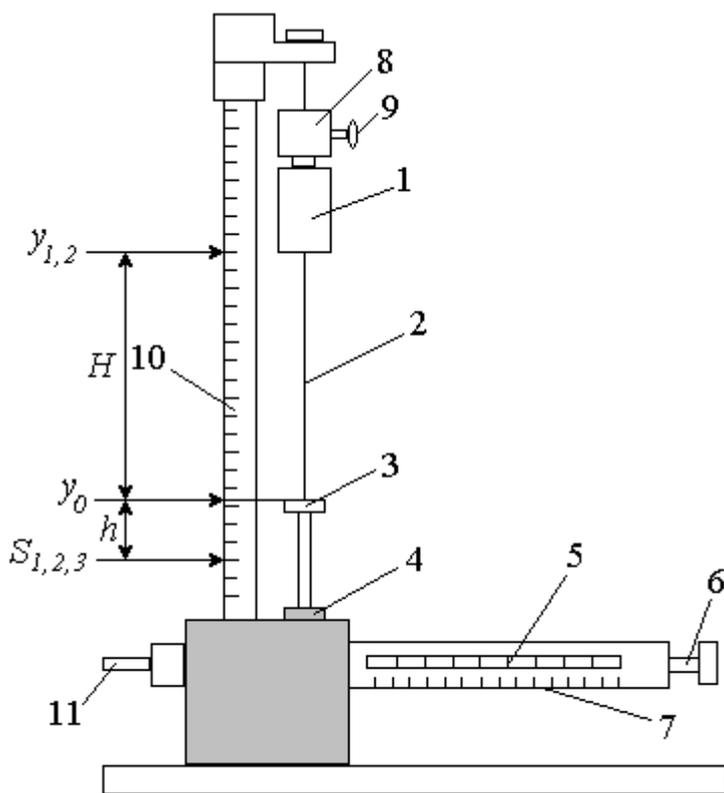


рис. 6.2

Схема установки показана на рис. 6.2. Модель копра состоит из груза (1), который может перемещаться по вертикальной направляющей проволоке (2), и сваи (3). Свая может скользить в устройстве, моделирующем свойства грунта, схематически показанном на рис. 6.3. Усилие пружины регулируется с помощью винта (6). Для удержания груза (1) на некоторой высоте над сваей до удара служит механический фиксатор (8), который можно перемещать по вертикали и закреплять в нужном положении стопорным винтом. Груз поднимают до срабатывания защелки фиксатора. Освобождение груза производится нажатием пусковой кнопки (9) фиксатора. Свая (3) может быть легко освобождена от нагрузки с помощью рычага (11). Координаты груза и сваи до и после удара измеряются по вертикальной шкале (10) с помощью указателей, прикрепленных к грузу и свае.

На рис. 6.3 показано устройство, моделирующее сопротивление грунта. Здесь:

3 – свая, 4 – втулка обоймы, 5 – пружина, 7 – шкала для определения усилия пружины, F – сила, сжимающая пружину, равная силе давления втулки обоймы на сваю.

Сила сопротивления пропорциональна силе трения сваи о втулку обоймы: $F_{\text{сопр}} \sim \mu F_{\text{давл}}$, $F_{\text{сопр}} \sim N$, где N – количество делений на шкале 7 (устанавливается по указанию преподавателя).

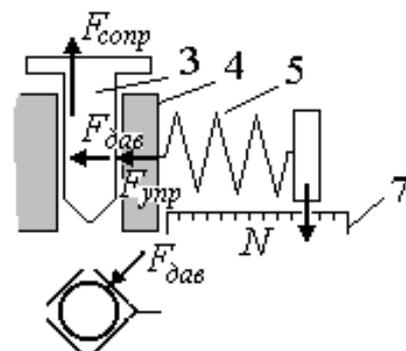


рис. 6.3

Порядок выполнения работы

1. Получите допуск к работе с установкой.
2. Визуально ознакомьтесь с установкой.
3. Заполните таблицу № 1.

Таблица № 1. Спецификация измерительных приборов

| № п.п. | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|--------|----------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | | | | |
| 2. | | | | |

4. Запишите данные установки:

$$m_1 = \dots\dots\dots ; m_2 = \dots\dots\dots ; y_0 = \dots\dots\dots$$

5. Определите (см. п. 2.2.2. введения) и запишите погрешности округления данных установки:

$$\Delta m_1 = \dots\dots\dots ; \Delta m_2 = \dots\dots\dots ; \Delta y_0 = \dots\dots\dots$$

$$\delta m_1 = \frac{\Delta m_1}{m_1} = \dots\dots\dots ; \delta m_2 = \dots\dots\dots ; \delta y_0 = \dots\dots\dots$$

6. По указанию преподавателя запишите в таблицу № 2 значения:

$$y_1 = \dots\dots\dots ; y_3 = \dots\dots\dots ; N_1 = \dots\dots\dots ; N_2 = \dots\dots\dots$$

Таблица № 2. Результаты измерений конечного положения указателя сваи.

| № п.п. | Серия I | | Серия II | | Серия III | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| | $N_1 = \dots\dots\dots$ дел.; | | $N_2 = \dots\dots\dots$ дел.; | | $N_3 = N_2 = \dots\dots\dots$ дел.; | |
| | $y_1 = \dots\dots\dots$ мм | | $y_2 = y_1 = \dots\dots\dots$ мм | | $y_3 = \dots\dots\dots$ мм | |
| | $S_{1i},$ мм | $ S_{1cp} - S_{1i} ,$ мм | $S_{2i},$ мм | $ S_{2cp} - S_{2i} ,$ мм | $S_{3i},$ мм | $ S_{3cp} - S_{3i} ,$ мм |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| средн. | | | | | | |

7. С помощью регулировочного винта (6) установите усилие пружины (5) величиной N_1 делений.
8. Зафиксируйте груз (1) в фиксаторе (8).
9. Установите фиксатор (8) так, чтобы координата точек нижней поверхности груза стала равной y_1 .
10. Отжав рычаг (11) вниз одной рукой, другой одновременно поднимите сваю (2) на максимально возможную высоту y_0 .
11. Нажмите на кнопку (9) («пуск» груза).
12. После соударения груза со сваем запишите координаты конечного положения указателя сваи S_1 в таблицу № 2.
13. Верните груз (1) в фиксатор (8).
14. Повторите п.п. 10-13 пять раз.
15. Для проведения II серии измерений, не меняя положение фиксатора, измените с помощью винта (6) усилие пружины (5) до значения N_2 делений.
16. Повторите п.п. 10-13, записывая в таблицу № 2 координату конечного положения указателя сваи S_2 .
17. Для проведения III серии измерений измените положение фиксатора (8) так, чтобы начальная координата точек нижней поверхности груза (1) стала равной y_3 .
18. Повторите п.п. 10-13, записывая в таблицу № 2 координату конечного положения указателя сваи S_3 .

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте H_1 и H_3 – высоты падения груза по формуле (6.11), для соответствующих начальных координат нижней точки груза y_1 и y_3 .
2. Для каждой из измеренных величин найдите среднее арифметическое значение по формуле: $x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$, записывая их в таблицу № 2 (Под буквой x понимаются соответственно S_1, S_2, S_3 .)
3. Рассчитайте глубину погружения сваи в каждой серии опытов h_1, h_2, h_3 по формуле (6.12), используя средние значения S_1, S_2, S_3 .
4. Рассчитайте значения силы сопротивления грунта для каждой серии опытов F_1, F_2, F_3 , по формуле (6.10).
5. Рассчитайте отношения $\frac{F_1}{F_2}$ и $\frac{N_1}{N_2}$.
6. Покажите результаты преподавателю.

7. Найдите отклонения от среднего $\Delta S_i = |S_{\text{ср}} - S_i|$ для величины S_1 , записанной в таблице № 2, записывая, полученные значения в соответствующие ячейки таблицы № 2.

8. Вычислите случайную погрешность прямого измерения (среднее отклонение от среднего) величины S_1 по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = \frac{|x_{\text{ср}} - x_1| + |x_{\text{ср}} - x_2| + |x_{\text{ср}} - x_3| + |x_{\text{ср}} - x_4| + |x_{\text{ср}} - x_5|}{5}, \text{ запишите по-}$$

лученное значение в соответствующую ячейку последней строки таблицы № 2.

9. Вычислите полную погрешность прямого измерения для величины S_1 по формуле $\Delta x = \Delta x_{\text{пр}} + \Delta x_{\text{сл}}$, используя соответствующее значение приборной погрешности из таблицы № 1.

10. Округлите значения абсолютной погрешности и результата прямого измерения для величины S_1 (см. стр. 15 Запись результата).

11. Запишите результат прямого измерения величины S_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$x = (x_{\text{ср}} \pm \Delta x) \text{ (единицы измерения)}.$$

12. Аналогичным образом обработайте результаты измерений глубины погружения сваи для II и III серии измерений, выполнив пункты 7 – 11 для величин S_2 и S_3 , записанных в таблице № 2.

13. Вычислите абсолютные погрешности определения высоты падения груза и глубины погружения сваи для I серии измерений по формулам $\Delta H_1 = \Delta y_1 + \Delta y_0$; $\Delta h_1 = \Delta y_0 + \Delta S_1$. Согласно п. 2.1.3. введения, погрешность измерения величины y_1 примите равной приборной.

14. Вычислите относительные погрешности определения высоты падения груза и глубины погружения сваи для I серии измерений по

$$\text{формулам } \delta H_1 = \frac{\Delta H_1}{H_1}; \quad \delta h_1 = \frac{\Delta h_1}{h_1}.$$

15. Рассчитайте относительную погрешность определения силы сопротивления $\delta F_1 = \delta m_1 + \delta m_2 + \delta H_1 + \delta h_1$.

16. Рассчитайте абсолютную погрешность измерений силы сопротивления $\Delta F_1 = F_1 \cdot \delta F_1$.

17. Округлите полученное значение абсолютной погрешности.

18. Запишите результат косвенного измерения величины F_1 в виде доверительного интервала (см. стр. 15 Запись результата)

$$F_1 = (F_{1\text{ср}} \pm \Delta F_1) \text{ (единицы измерения)}.$$

19. Выполните пункты 13 – 19 для результатов II и III серий измерений, запишите результаты косвенного измерения величин F_2 и F_3 в виде доверительного интервала.

20. Сравните: а) значения F_2 и F_3 с учетом интервалов погрешностей (см. п. 3.5 введения);

б) отношение $\frac{F_1}{F_2}$ с отношением $\frac{N_1}{N_2}$.

21. На основании п. 20 сделайте выводы о том, какие факторы влияют на величину силы сопротивления.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается цель данной работы?
2. Что такое импульс тела (системы тел)?
3. Что такое механическая энергия тела (системы тел)?
4. Какие физические величины определяются в данной работе прямыми измерениями? С помощью каких измерительных приборов?
5. Как формулируется закон сохранения импульса? Каковы условия применимости этого закона?
6. Что такое механическая работа?
7. Что такое работа силы?
8. Что такое энергия? Какие виды энергии вы знаете?
9. Что такое механическая энергия? Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
10. Как можно изменить механическую энергию?
11. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.
12. Какой удар называется абсолютно неупругим?
13. Какие процессы происходят при соударении груза и сваи? Можно ли для такого удара применить закон сохранения механической энергии? Почему?
14. Выведите формулу для расчета силы сопротивления «грунта» по данным лабораторной работы.
15. Как рассчитываются погрешности величин H и h ?

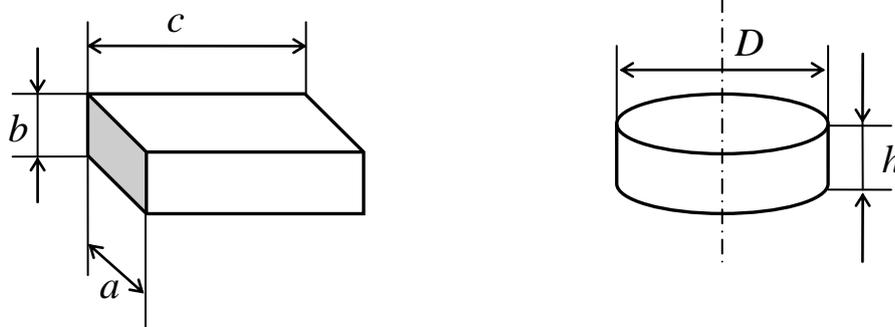
ТИПОВОЙ ПРОТОКОЛ

(Перепишите при подготовке к этой лабораторной работе. В дальнейшем соблюдайте такой же порядок записи и обработки результатов)

ДАТА _____
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

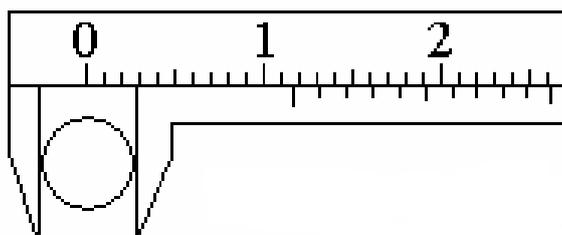
Измерение объемов тел правильной формы

Цель работы: проведение прямых и косвенных измерений и овладение методами расчета их погрешностей.



Описание приборов

Измеряемые тела



Штангенциркуль

Расчетные формулы

$$\text{Для диска} - V_{\text{д}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$$

$$\text{Для параллелепипеда} - V_{\text{п}} = a \cdot b \cdot c$$

Таблица № 1. Спецификации измерительных приборов.

| № п/п | Наименование прибора | Предел измерения | Цена деления | Приборная погрешность |
|-------|---|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. | линейка | | | |
| 2. | штангенциркуль с числом делений нониуса | | | |

Таблица № 2. Результаты измерения линейных размеров параллелепипеда штангенциркулем.

| № п/п | a_i мм | $ a_{\text{ср}} - a_i $ мм | b_i мм | $ b_{\text{ср}} - b_i $ мм | c_i мм | $ c_{\text{ср}} - c_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| средн. | | | | | | |

Таблица № 3. Результаты измерения линейных размеров параллелепипеда линейкой.

| № п/п | a_i мм | $ a_{\text{ср}} - a_i $ мм | b_i мм | $ b_{\text{ср}} - b_i $ мм | c_i мм | $ c_{\text{ср}} - c_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| средн. | | | | | | |

Таблица № 4. Результаты измерения линейных размеров диска

| № п/п | D_i мм | $ D_{\text{ср}} - D_i $ мм | h_i мм | $ h_{\text{ср}} - h_i $ мм |
|--------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| средн. | | | | |

Обработка результатов измерений

Расчет результатов косвенных измерений

$V_{\text{п}}^{\text{шц}} =$ (подстановка чисел в формулу)

$V_{\text{п}}^{\text{линейка}} =$

$V_{\text{диск}} =$

Расчет погрешностей прямых измерений

Расчет по таблице № 2 измерений размеров параллелепипеда штангенциркулем

Вычисление случайных погрешностей

$\Delta a_{\text{сл}} =$ _____

$\Delta b_{\text{сл}} =$ _____

$\Delta c_{\text{сл}} =$ _____

Вычисление полных погрешностей

$\Delta a =$ + =

$\Delta b =$ + =

$\Delta c =$ + =

Вычисление относительных погрешностей

$\delta a =$ _____

$\delta b =$ _____

$\delta c =$ _____

Результаты прямых измерений размеров параллелепипеда штангенциркулем, записанные в виде доверительного интервала

$$a =$$

$$b =$$

$$c =$$

Расчет по таблице № 3 измерений размеров параллелепипеда линейкой
Вычисление случайных погрешностей

$$\Delta a_{\text{сл}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Delta b_{\text{сл}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Delta c_{\text{сл}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Вычисление полных погрешностей

$$\Delta a = \quad + \quad =$$

$$\Delta b = \quad + \quad =$$

$$\Delta c = \quad + \quad =$$

Вычисление относительных погрешностей

$$\delta a = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\delta b = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\delta c = \underline{\hspace{2cm}}$$

Результаты прямых измерений размеров параллелепипеда линейкой, записанные в виде доверительного интервала

$$a =$$

$$b =$$

$$c =$$

Расчет по таблице № 4 измерений размеров диска штангенциркулем
Вычисление случайных погрешностей

$$\Delta D_{\text{сл}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Delta h_{\text{сл}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Вычисление полных погрешностей

$$\Delta D = \quad + \quad =$$

$$\Delta h = \quad + \quad =$$

Вычисление относительных погрешностей

$$\delta D = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\delta h = \underline{\hspace{2cm}}$$

Результаты прямых измерений размеров параллелепипеда штангенциркулем, записанные в виде доверительного интервала

$$D =$$

$$h =$$

Расчет погрешностей косвенных измерений

Вычисление погрешности косвенного измерения объема параллелепипеда, измеренного штангенциркулем

$$\delta V_{\text{п}}^{\text{шц}} =$$

$$\Delta V_{\text{п}}^{\text{шц}} =$$

Вычисление погрешности косвенного измерения объема параллелепипеда, измеренного линейкой

$$\delta V_{\text{п}}^{\text{линейка}} =$$

$$\Delta V_{\text{п}}^{\text{линейка}} =$$

Вычисление погрешности косвенного измерения объема диска

$$\delta V_{\text{диск}} =$$

$$\Delta V_{\text{диск}} =$$

Результаты косвенных измерений объемов тел, записанные в виде доверительного интервала

$$V_{\text{п}}^{\text{шц}} =$$

$$V_{\text{п}}^{\text{линейка}} =$$

$$V_{\text{диск}} =$$

Анализ полученных результатов

$V_{\text{п}}, \text{мм}^3$

Выводы

Ирина Владимировна Воинкова
Юлия Эдуардовна Зуковская
Алла Яковлевна Казанская
Михаил Владимирович Лукашевский

Редактор Казанская А.Я.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
для учащихся 10 классов лицея № 1502 при МЭИ. Часть I.

Отпечатано в типографии лицея