

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО РАЗДЕЛАМ «МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»**

ОМСК 2023

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО РАЗДЕЛАМ «МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Утверждено методическим советом университета

Омск 2023

УДК 531(076.5)
ББК 22.2я73
У91

Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по разделам «Механика» и «Молекулярная физика» / А. С. Лапина, Л. А. Литневский, М. Х. Минжасаров, Ю. М. Сосновский; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2023. 33 с.

Пособие содержит семь лабораторных работ по механике, молекулярной физике и термодинамике, в которых на основе деятельностного подхода сформулированы задания для выполнения студентами лабораторных работ и оформления результатов. В планы деятельности при подготовке и выполнении лабораторных работ включены QR-коды для доступа к методическим пособиям и универсальному алгоритму вычисления погрешностей, сервису подбора коэффициента Стюдента, он-лайн курсу подготовки к выполнению лабораторных работ.

Использование пособия будет способствовать формированию у студентов мета-предметных компетентностей по овладению ими общенаучными понятиями и обобщенными экспериментальными умениями через применение приемов развития естественно-научного, а значит, и технического мышления и посредством овладения студентами структурой деятельности по выполнению физического эксперимента и ее проекции на их будущую профессиональную деятельность.

Предназначено для студентов первого курса очной формы обучения.

Библиогр.: 5 назв. Табл. 5. Рис. 7.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. А. Николаев;
канд. физ.-мат. наук, доцент В. В. Дмитриев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Планы деятельности при подготовке и выполнении лабораторных работ	6
Лабораторная работа 1. Определение плотности твердого тела	9
1.1. Теоретический блок	9
1.2. Практико-вычислительный блок	9
1.3. Блок расчета погрешностей	9
Лабораторная работа 2. Определение коэффициента трения скольжения	12
2.1. Теоретический блок	12
2.2. Практико-вычислительный блок	13
2.3. Блок расчета погрешностей	14
Лабораторная работа 3. Определение момента инерции маятника Обербека	15
3.1. Теоретический блок	15
3.2. Практико-вычислительный блок	16
3.3. Блок расчета погрешностей	16
Лабораторная работа 4. Изучение законов столкновения тел при ударах	17
4.1. Теоретический блок	17
4.2. Практико-вычислительный блок	18
4.3. Блок расчета погрешностей	19
Лабораторная работа 5. Определение показателя адиабаты для воздуха	20
5.1. Теоретический блок	20
5.2. Практико-вычислительный блок	21
5.3. Блок расчета погрешностей	22
Лабораторная работа 6. Определение коэффициента вязкости воды	24
6.1. Теоретический блок	24
6.2. Практико-вычислительный блок	24
6.3. Блок расчета погрешностей	25
Лабораторная работа 7. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха	27
7.1. Теоретический блок	27
7.2. Практико-вычислительный блок	28
7.3. Блок расчета погрешностей	29
Библиографический список	32

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что физика – это «экспериментальная» наука, все известные сегодня физические законы многократно проверены и подтверждены экспериментально.

Лабораторный практикум курса физики в вузе представляет собой возможность для студентов повторить путь великих открытий и убедиться в справедливости фундаментальных физических истин.

Таким образом, **задачей** дисциплины «Физика» является экспериментальное подтверждение студентами известных в науке физических законов.

Значение данной дисциплины состоит в том, что

она помогает детально на практике наблюдать физические явления, процессы и свойства;

дает представление о приборах, необходимых для измерения физических величин, характеризующих наблюдаемые явления, свойства, процессы;

позволяет изучить основные методы физических измерений и оценки их результатов;

формирует глубокое понимание сути физических явлений и физических закономерностей.

По итогам освоения указанной дисциплины у студентов прогнозируются конкретные **результаты**, которые будут выражены в том, что студенты смогут самостоятельно проектировать естественно-научные эксперименты, а именно:

- по названию лабораторной работы ставить цель эксперимента;
- после изучения теоретического блока лабораторной работы выдвигать гипотезу относительно достижения цели;
- анализировать особенности эксперимента, в том числе определять величины, которые будут измерены напрямую, и необходимые для этого приборы и оборудование;
- оформлять записи результатов эксперимента в виде таблицы;
- проводить физические опыты;
- работать с физическими приборами;
- осуществлять математическую обработку экспериментальных результатов, в том числе вычислять абсолютную и относительную погрешности для прямых и косвенных измерений;
- анализировать полученные результаты и формулировать выводы.

ПЛАНЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Чек-лист подготовки к лабораторным занятиям (выполнить самостоятельно до занятий)

1. Прочитать теоретический блок работы.
2. Ознакомиться с практико-вычислительным блоком работы.
3. Выполнить задания он-лайн курса для данной лабораторной работы.

QR-код для доступа к он-лайн курсу «Лабораторные работы по физике. 1-й семестр» на портале ОмГУПСa (по правам доступа к курсу обратитесь к преподавателю).



4. В рабочую тетрадь необходимо вписать следующее:

- название работы;
- цель исследования (самостоятельно формулируется в соответствии с темой работы);
- гипотезу исследования (образец: «Если измерить ... (физические величины) с помощью ... (измерительные приборы), то можно рассчитать ... (физическая величина, заданная в цели) по формуле: (формула расчета физической величины, заданной в цели) ...»);
- перечень измерительных приборов и принадлежностей, используемых в работе;
- чертеж или рисунок схемы установки;
- таблицы для записей результатов измерений по образцам.

1) Сначала одну таблицу для всех величин, измеряемых *однократно* (табл. 1).

Таблица 1

Константы, параметры установки и
результаты **однократного** измерения величин

Название	Символ	Значение $m_{п\ i}$	Инструментальная погрешность $\Delta m_{п\ ин}$	Множ. системы СИ	Единицы измерения	Относительная погрешность $\varepsilon m_{п\ } \%$
Масса подставки	m_n	42,1	0,1	10^{-3}	кг	0,24 %

2) Затем n таблиц для n числа величин, измеряемых *многократно* (табл. 2).

Таблица 2

Константы, параметры установки и
результаты **многократного** измерения величин

Название	Символ	Значение a_i	Инструментальная погрешность $\Delta a_{ин}$	Множ. системы СИ	Единицы измерения	Среднее значение $\langle a \rangle$	Случайная погрешность $\Delta a_{сл}$	Абсолютная погрешность Δa	Относительная погрешность $\varepsilon_a, \%$
Высота тела	a	17,6	0,1	10^{-3}	м	17,6	0,38	0,39	2,2 %
		17,4							
		17,7							

Чек-лист хода лабораторного занятия (в лаборатории)

1. Доложить преподавателю ход планируемой работы и показать оформление тетради.
2. Ознакомиться с принципом действия приборов.
3. Собрать схему установки.
4. Пригласить преподавателя проверить собранную схему.
5. Приступить к проведению эксперимента.
6. Результаты эксперимента занести в подготовленные дома таблицы.
7. По завершении измерений выключить установку, привести рабочее место в порядок.
8. Показать измерения преподавателю.
9. Получить отметку преподавателя о выполненных измерениях.
10. Выполнить необходимые расчеты с измеренными величинами для нахождения искомых величин по формулам.

11. Произвести расчеты погрешностей искомых величин (в случае необходимости результаты эксперимента приводятся в виде графиков).

QR-код для доступа к **методическому пособию**, содержащему **подробную** информацию относительно **расчета погрешностей**.



QR-код для доступа к **краткому универсальному алгоритму** вычисления погрешностей.



QR-код для доступа к сервису по определению необходимого для расчетов **коэффициента** Стьюдента $t_{\alpha,n}$.



12. Записать окончательный результат измерений искомых величин.

13. Сформулировать вывод (краткий анализ полученных результатов и погрешностей на реалистичность и достоверность, сравнение их с табличными значениями).

До следующего занятия:

1. Полностью оформить результаты предыдущей лабораторной работы.
2. Завершить выполнение заданий он-лайн курса для данной лабораторной работы.
3. Подготовиться к следующей лабораторной работе (ее номер уточнить у преподавателя) по чек-листу подготовки к лабораторным занятиям.

На следующем занятии:

1. Выполнить все пункты плана «План деятельности при подготовке и выполнении лабораторных работ» для новой лабораторной работы.
2. Спланировать работу так, чтобы **обязательно** успеть защитить перед преподавателем результаты предыдущей работы.
3. Быть готовым к дополнительным заданиям и контрольным вопросам:
 - 1) Как в лабораторной работе достигается поставленная цель?
 - 2) Пояснить расчет погрешностей в лабораторной работе.
 - 3) Проанализировать полученные результаты.
 - 4) Сформулировать определения физических величин и физических законов, используемых в лабораторной работе.

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1.1. Теоретический блок

Плотность тела, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m}{abc}, \quad (1.1)$$

где m – масса твердого тела, кг;

a , b , c – геометрические линейные размеры параллелепипеда (высота, длина, ширина), м.

1.2. Практико-вычислительный блок

- 1) Измерить один раз массу m твердого тела на весах.
- 2) Измерить геометрические размеры тела a , b , c (высоту, длину, толщину) штангенциркулем. Измерения провести многократно.
- 3) Результаты измерений m , a_i , b_i , c_i и значения их инструментальной погрешности $\Delta m_{\text{ин}}$, $\Delta a_{\text{ин}}$, $\Delta b_{\text{ин}}$, $\Delta c_{\text{ин}}$ для каждой измеряемой величины занести в табл. 1 и 2 (см. стр. 6, 7).
- 4) Произвести оценочный (приблизительный) расчет плотности твердого тела по формуле и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.
- 5) Выполнить математическую обработку результатов *прямых* измерений величин (см. п. 1.3.1). Занести результаты вычислений в табл. 1 и 2.
- 6) Выполнить математическую обработку результатов *косвенных* измерений величин (см. п. 1.3.2). Занести результаты вычислений в табл. 1 и 2.
- 7) Сравнить полученный результат с табличным значением $\rho_{\text{ст}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ и сделать вывод.
- 8) Выполните задания он-лайн курса (см. QR-код на стр. 6).

1.3. Блок расчета погрешностей

1.3.1. Математическая обработка результатов прямых измерений

Требуется провести расчет погрешности прямых измерений. За наиболее достоверный результат измерения принять средние арифметические значения, определяемые выражениями:

$$\begin{cases} \langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i; \\ \langle b \rangle = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i; \\ \langle c \rangle = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i. \end{cases} \quad (1.2)$$

Абсолютные погрешности отдельных измерений определить как разности между средними значениями $\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle$ измеряемых величин и значениями $a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_n; c_1, c_2, \dots, c_n$, полученными при отдельных измерениях, т. е.

$$\begin{cases} \Delta a_1 = \langle a \rangle - a_1; & \Delta b_1 = \langle b \rangle - b_1; & \Delta c_1 = \langle c \rangle - c_1; \\ \Delta a_2 = \langle a \rangle - a_2; & \Delta b_2 = \langle b \rangle - b_2; & \Delta c_2 = \langle c \rangle - c_2; \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta a_i = \langle a \rangle - a_i; & \Delta b_i = \langle b \rangle - b_i; & \Delta c_i = \langle c \rangle - c_i; \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta a_n = \langle a \rangle - a_n; & \Delta b_n = \langle b \rangle - b_n; & \Delta c_n = \langle c \rangle - c_n. \end{cases} \quad (1.3)$$

Случайные погрешности измеряемых величин рассчитать по формулам:

$$\begin{cases} \Delta a_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \cdot S_a = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}{n \cdot (n-1)}}; \\ \Delta b_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \cdot S_b = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta b_i^2}{n \cdot (n-1)}}; \\ \Delta c_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \cdot S_c = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta c_i^2}{n \cdot (n-1)}}, \end{cases} \quad (1.4)$$

где S_a, S_b, S_c – среднеквадратичные ошибки в данных сериях измерений;

n – количество измерений в серии;

$\Delta a_i, \Delta b_i, \Delta c_i$ – абсолютные погрешности отдельных измерений;

$t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице коэффициентов Стьюдента или он-лайн сервису (см. QR-код на стр. 8).

Абсолютные погрешности измеряемых величин определить через случайные и инструментальные погрешности по следующим выражениям:

$$\begin{cases} \Delta a = \sqrt{\Delta a_{\text{сл}}^2 + \Delta a_{\text{ин}}^2}; \\ \Delta b = \sqrt{\Delta b_{\text{сл}}^2 + \Delta b_{\text{ин}}^2}; \\ \Delta c = \sqrt{\Delta c_{\text{сл}}^2 + \Delta c_{\text{ин}}^2}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Относительная погрешность показывает, какую долю составляет абсолютная погрешность от истинного значения измеряемой величины:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta m}{\langle m \rangle} \cdot 100\%; \quad \varepsilon_a = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%; \quad \varepsilon_b = \frac{\Delta b}{\langle b \rangle} \cdot 100\%; \quad \varepsilon_c = \frac{\Delta c}{\langle c \rangle} \cdot 100\%. \quad (1.6)$$

С учетом правил округления и представления результатов окончательный результат измерений представить в виде:

$$\begin{cases} m = (\langle m \rangle \pm \Delta m) \text{ ед. изм. с } \varepsilon_m = \dots\% \text{ при } \alpha = \dots; \\ a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) \text{ ед. изм. с } \varepsilon_a = \dots\% \text{ при } \alpha = \dots; \\ b = (\langle b \rangle \pm \Delta b) \text{ ед. изм. с } \varepsilon_b = \dots\% \text{ при } \alpha = \dots; \\ c = (\langle c \rangle \pm \Delta c) \text{ ед. изм. с } \varepsilon_c = \dots\% \text{ при } \alpha = \dots. \end{cases} \quad (1.7)$$

1.3.2. Математическая обработка результатов косвенных измерений

Для математической обработки косвенных измерений необходимо вычислить среднее значение $\langle \rho \rangle$ плотности твердого тела по формуле (1.1), подставив в нее средние значения $m, \langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle$ прямо измеренных величин. Так как искомая величина представляет собой выражение вида

$$\rho(m, a, b, c) = m^1 \cdot a^{-1} \cdot b^{-1} \cdot c^{-1}, \quad (1.8)$$

т. е. не содержит операций сложения и вычитания, причем степени величин m, a, b, c могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, проще сначала найти относительную погрешность ε_ρ . Действительно, с учетом правила дифференцирования сложной функции

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\langle \rho \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial c} \Delta c\right)^2}. \quad (1.9)$$

Чтобы применить выражение (1.9), необходимо прологарифмировать формулу (1.8):

$$\ln \rho = \ln m - \ln a - \ln b - \ln c. \quad (1.10)$$

Вычисляя частные производные, получим:

$$\frac{\partial}{\partial m} \ln \rho = \frac{1}{m}; \quad \frac{\partial}{\partial a} \ln \rho = -\frac{1}{a}; \quad \frac{\partial}{\partial b} \ln \rho = -\frac{1}{b}; \quad \frac{\partial}{\partial c} \ln \rho = -\frac{1}{c}. \quad (1.11)$$

Окончательно формула для определения относительной погрешности примет вид:

$$\varepsilon_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{\langle m \rangle}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2} = \sqrt{(\varepsilon_m)^2 + (\varepsilon_a)^2 + (\varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c)^2}. \quad (1.12)$$

После этого рассчитывают абсолютную погрешность $\Delta \rho$ по формуле $\Delta \rho = \varepsilon_{\rho} \cdot \langle \rho \rangle$ и записывают окончательный результат в стандартном виде:

$$\rho = (\langle \rho \rangle \pm \Delta \rho) \text{ ед. изм. с } \varepsilon_{\rho} = \dots \% \text{ при } \alpha = 0,95. \quad (1.13)$$

Лабораторная работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

2.1. Теоретический блок

Экспериментальная установка содержит узел «наклонная плоскость», в котором предусмотрена возможность изменять угол наклона плоскости к горизонту, и соскальзывающий брусок массой m . Схема узла «наклонная плоскость» приведена на рис. 2.1, где 1 – ролик опускающегося груза; 2 – кнопка «стоп» с ограничителем; 3 – плоскость с измерительной линейкой; 4 – отсчетное устройство; 5 – указатель; 6 – стопорный винт; 7 – электромагнит; 8 – ролик поднимающегося груза. Узел «наклонная плоскость» шарнирно закреплен на основании лабораторной установки, что позволяет менять угол его наклона к горизонту и фиксировать его стопорным винтом.

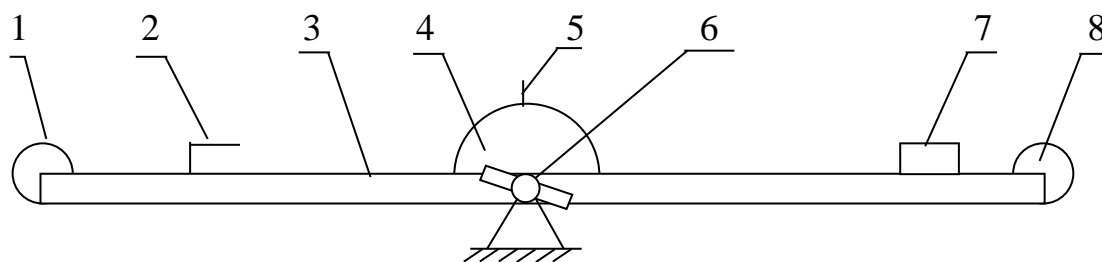


Рис. 2.1. Схема узла «наклонная плоскость»

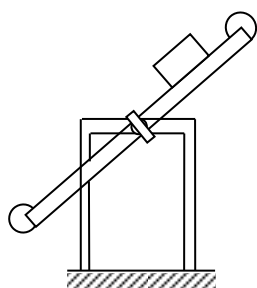


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки

В качестве пар трения используются пары «сталь – алюминий», «алюминий – алюминий», поверхности, которых отшлифованы. Коэффициент трения скольжения небольшого тела, соскальзывающего по плоскости (рис. 2.2), наклоненной под углом α к горизонту, за время t соскальзывания и проходящее вдоль наклонной плоскости расстояние s вычисляются по формуле:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2s}{gt^2 \cos \alpha}. \quad (2.1)$$

2.2. Практико-вычислительный блок

1) Ослабить стопорный винт 6 на узле «наклонная плоскость» (см. рис. 2.1) и повернуть плоскость на требуемый угол. Контроль угла осуществить с помощью указателя 5 и отсчетного устройства 4. Зафиксировать положение плоскости стопорным винтом 6.

2) Однократно измерить угол α наклона плоскости, а также при помощи линейки 3 пройденное расстояние s . Результаты измерений, а также указанное на лабораторной установке значение ускорения свободного падения g и значения их инструментальных погрешностей занести в табл. 1 и 2 (см. стр. 6, 7).

3) Электронный секундомер перевести в режим «1». Переключить тумблер, расположенный слева на основании установки, «на себя». Поместить соскальзывающее тело деревянной стороной вниз в верхний конец плоскости, где оно будет зафиксировано магнитным полем электромагнита 7.

4) Нажать кнопку «Пуск» секундомера и многократно (не менее трех раз) измерить время соскальзывания тела с наклонной плоскости. Аналогично провести измерения времени соскальзывания тела, расположенного металлической поверх-

ностью вниз на наклонной плоскости. Результаты измерений времени t_i и значения их инструментальной погрешности $\Delta t_{ин}$ занести в таблицу.

5) Произвести оценочный (приблизительный) расчет коэффициентов трения по формуле (2.1) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

6) Выполнить математическую обработку результатов *прямых* измерений величин, входящих в формулу (2.1) (см. п. 1.3.1).

7) Выполнить математическую обработку результатов *косвенных* измерений (см. подразд. 2.3).

8) Сравнить полученные результаты с табличными (табл. 2.1) и сделать вывод.

9) Выполнить задания он-лайн курса (см. стр. 6).

2.3. Блок расчета погрешностей

Требуется провести расчет погрешности *косвенных* измерений. Для этого необходимо вычислить среднее значение $\langle \mu \rangle$ коэффициента трения по формуле (2.1) и его абсолютную погрешность $\Delta \mu$ по формуле:

$$\Delta \mu = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha (rad) \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial s} \cdot \Delta s \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial g} \cdot \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2}, \quad (2.2)$$

где частные производные $\frac{\partial \mu}{\partial \alpha} = \frac{1}{\cos^2 \alpha} - \frac{2s}{gt^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}$; $\frac{\partial \mu}{\partial s} = -\frac{2}{gt^2 \cos \alpha}$; $\frac{\partial \mu}{\partial g} = \frac{2s}{t^2 \cos \alpha} \cdot \frac{1}{g^2}$; $\frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{2s}{g \cos \alpha} \cdot \frac{2}{t^3}$ вычисляются при средних значениях $\langle \alpha \rangle$, $\langle s \rangle$, $\langle g \rangle$, $\langle t \rangle$. Обратите внимание на то, что величина $\Delta \alpha$ должна быть представлена в радианах, а не в градусах.

Вычислить относительную погрешность коэффициента трения по формуле:

$$\varepsilon_{\mu} = \frac{\Delta \mu}{\langle \mu \rangle} \cdot 100 \%. \quad (2.3)$$

Записать окончательный результат (с учетом правил округления) в виде:

$$\mu = \langle \mu \rangle \pm \Delta \mu \quad \text{с} \quad \varepsilon_{\mu} = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (2.4)$$

Значения коэффициентов трения скольжения

Коэффициент трения скольжения μ :	
металл по металлу	0,15 – 0,30
дерево по металлу	0,20 – 0,60

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

3.1. Теоретический блок

Крестообразный маятник Обербека состоит из стержней, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу (рис. 3.1).

На эту же втулку насажены два шкива различных радиусов. Вся эта система может свободно вращаться вокруг закрепленной горизонтальной оси. На стержнях крестовины на одинаковых расстояниях от оси вращения Oz укреплены четы-

ре цилиндра массой $m_{ц}$ и диаметром $d_{ц}$ каждый. Цилиндры можно закреплять на различных расстояниях R_i от оси вращения. На один из шкивов наматывается нить, к концу которой привязан груз массой m . Груз натягивает нить и приводит маятник Обербека во вращательное движение.

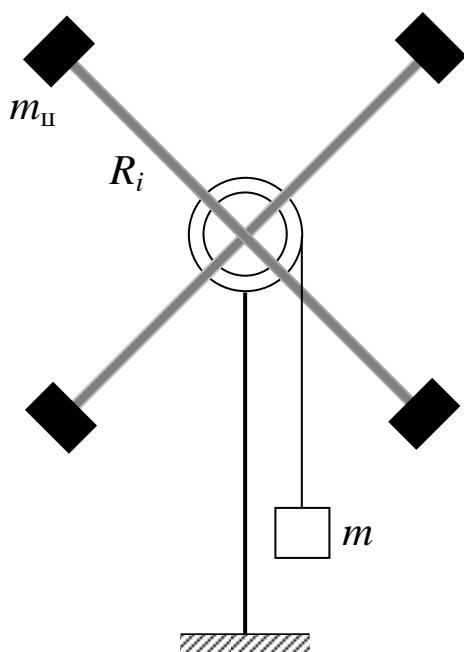


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки с маятником Обербека

Момент инерции маятника Обербека после измерения диаметра шкива d , массы опускающегося груза m , высоты h , на которой находился груз в начальный момент времени, и времени t , в течение которого груз опускается с высоты h , вычисляется по формуле:

$$I = \frac{md^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (3.1)$$

3.2. Практико-вычислительный блок

1) Задать высоту h , на которой находился груз в начальный момент времени, по указанию преподавателя. Результат однократного измерения высоты h , а также указанные на лабораторной установке диаметр шкива d , массу груза m , ускорение свободно падающего тела g и значения их инструментальных погрешностей занести в таблицу (см. стр. 6).

2) Электронный секундомер перевести в режим «2». Нажать кнопку «Пуск» и многократно (не менее трех раз) измерить время t , в течение которого груз опускается с высоты h . Результаты измерений t_i и значения их инструментальной погрешности $\Delta t_{\text{ин}}$ занести в таблицу.

3) Произвести оценочный (приблизительный) расчет момента инерции маятника по формуле (3.1) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

4) Выполнить математическую обработку результатов *прямых* измерений величин, входящих в формулу (3.1) (см. п. 1.3.1).

5) Выполнить математическую обработку результатов *косвенных* измерений (см. подразд. 3.3).

6) Сделать вывод.

7) Выполнить задания он-лайн курса (см. QR-код на стр. 6).

3.3. Блок расчета погрешностей

Вычислить среднее значение $\langle I \rangle$ момента инерции по формуле (3.1) и его абсолютную погрешность ΔI по формуле:

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial m} \cdot \Delta m \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial d} \cdot \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial g} \cdot \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial h} \cdot \Delta h \right)^2}, \quad (3.2)$$

где частные производные $\frac{\partial I}{\partial m} = \frac{d^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right)$; $\frac{\partial I}{\partial d} = \frac{2md}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right)$; $\frac{\partial I}{\partial g} = \frac{md^2}{4} \cdot \frac{t^2}{2h}$;

$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{md^2}{4} \cdot \frac{2gt}{2h}$; $\frac{\partial I}{\partial h} = \frac{md^2}{4} \cdot \frac{gt^2}{2} \cdot \frac{(-1)}{h^2}$ вычисляются при средних значениях $\langle m \rangle, \langle d \rangle, \langle g \rangle, \langle t \rangle, \langle h \rangle$ прямо измеренных величин.

Вычислить относительную погрешность момента инерции по формуле:

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{\langle I \rangle} \cdot 100 \%. \quad (3.3)$$

Записать окончательный результат (с учетом правил округления) в виде:

$$I = \langle I \rangle \pm \Delta I \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_I = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (3.4)$$

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЕЛ ПРИ УДАРАХ

4.1. Теоретический блок

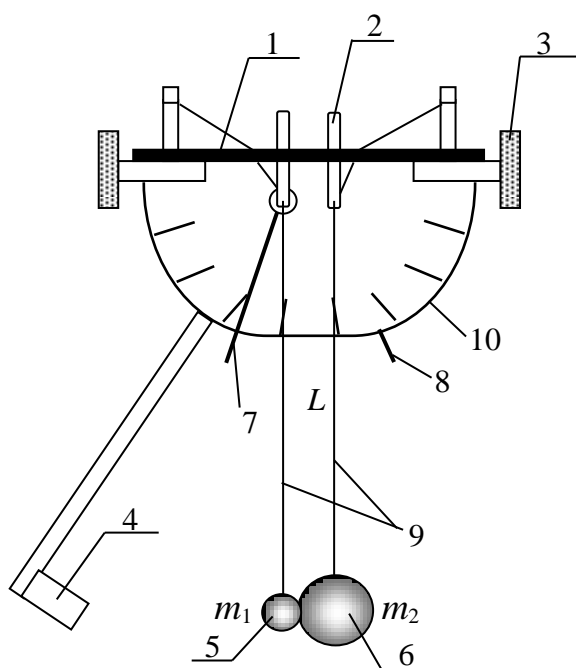


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки, содержащей узел «шары», приведена на рис. 4.1, где 1 – основание; 2 – держатель нити; 3 – регулятор длины нити; 4 – электромагнит; 5, 6 – первый и второй шары; 7, 8 – указатели отклонения первого и второго шаров; 9 – нить; 10 – шкала.

Установка для изучения ударов представляет собой два шара массой m_1 и m_2 , подвешенных на нитях длиной L (под длиной нити будем понимать расстояние от точки подвеса до центра шара).

Шары удерживаются в отклоненном положении электромагнитом. Углы отклонения шаров

от положения равновесия отсчитываются по шкале в градусах.

Проверить справедливость закона сохранения импульса при *неупругом* ударе шаров можно, отклоняя шар массой m_1 на угол α и закрепляя на втором шаре массой m_2 небольшой кусочек пластилина, а после неупругого столкновения, когда шары слипаются и движутся вместе, отклоняясь на угол β , вычис-

лить и сравнить импульсы системы шаров до и после столкновения по формулам:

$$p = 2m_1\sqrt{gL} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \quad (4.1)$$

$$p' = 2(m_1 + m_2)\sqrt{gL} \cdot \sin \frac{\beta}{2}. \quad (4.2)$$

4.2. Практико-вычислительный блок

1) Измерить расстояние L от точки подвеса до центра масс шара. Результат однократного измерения расстояния L , а также указанные на лабораторной установке массы шаров m_1 и m_2 , ускорение свободно падающего тела g и их инструментальные погрешности занести в таблицу (см. стр. 5).

2) Включить электромагнит в сеть и подвести к нему шар, измерить при этом начальный угол α отклонения шара. Результат измерения и инструментальную погрешность занести в таблицу.

3) Выключить электромагнит с помощью кнопки «Пуск». Шар освобождается и движется к положению равновесия. После неупругого столкновения шары должны двигаться вместе (добиться этого можно, формируя пластилин на поверхности второго шара). Многократно (не менее трех раз) измерить угол β , на который отклоняются шары. Результаты измерения угла β отклонения шаров и инструментальную погрешность занести в таблицу.

4) Произвести оценочный (приблизительный) расчет импульсов системы шаров до и после неупругого удара по формулам (4.1), (4.2) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

5) Выполнить математическую обработку результатов *прямых* измерений величин, входящих в формулы (4.1), (4.2) (см. п. 1.3.1).

6) Выполнить математическую обработку результатов *косвенных* измерений (см. подразд. 4.3).

7) Сравнить полученные значения импульсов системы шаров до и после неупругого и упругого столкновений, сделать вывод о справедливости закона сохранения импульса.

8) Выполнить задания он-лайн курса (см. QR-код на стр. 6).

4.3. Блок расчета погрешностей

Вычислить средние значения импульсов системы шаров до и после неупругого и упругого столкновений по формулам (4.1), (4.2), подставив в них средние значения $\langle m_1 \rangle, \langle m_2 \rangle, \langle L \rangle, \langle g \rangle, \langle \alpha \rangle, \langle \beta \rangle$ прямо измеренных величин.

Вычислить абсолютную погрешность импульса системы шаров *до* неупругого столкновения по формуле:

$$\Delta p = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial m_1} \cdot \Delta m_1\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial g} \cdot \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial L} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha (rad)\right)^2}, \quad (4.3)$$

где частные производные $\frac{\partial p}{\partial m_1} = 2\sqrt{gL} \cdot \sin(\alpha / 2)$; $\frac{\partial p}{\partial g} = 2m_1\sqrt{L} \cdot \sin(\alpha / 2) \cdot \frac{1}{2\sqrt{g}}$;
 $\frac{\partial p}{\partial L} = 2m_1\sqrt{g} \cdot \sin(\alpha / 2) \cdot \frac{1}{2\sqrt{L}}$; $\frac{\partial p}{\partial \alpha} = 2m_1\sqrt{gL} \cdot \frac{1}{2} \cos(\alpha / 2)$ вычисляются при средних значениях $\langle m_1 \rangle, \langle m_2 \rangle, \langle L \rangle, \langle g \rangle, \langle \alpha \rangle, \langle \beta \rangle$ прямо измеренных величин. Обратите внимание на то, что величина $\Delta \alpha$ должна быть представлена в радианах, а не в градусах.

Вычислить абсолютную погрешность импульса системы шаров *после* неупругого столкновения по формуле:

$$\Delta p' = \sqrt{\left(\frac{\partial p'}{\partial m_1} \cdot \Delta m_1\right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial m_2} \cdot \Delta m_2\right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial g} \cdot \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial L} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta (rad)\right)^2}, \quad (4.4)$$

где частные производные $\frac{\partial p'}{\partial m_1} = 2\sqrt{gL} \cdot \sin(\beta / 2)$; $\frac{\partial p'}{\partial m_2} = 2\sqrt{gL} \cdot \sin(\beta / 2)$;
 $\frac{\partial p'}{\partial g} = 2(m_1 + m_2)\sqrt{L} \cdot \sin(\beta / 2) \cdot \frac{1}{2\sqrt{g}}$; $\frac{\partial p'}{\partial L} = 2(m_1 + m_2)\sqrt{g} \cdot \sin(\beta / 2) \cdot \frac{1}{2\sqrt{L}}$;
 $\frac{\partial p'}{\partial \beta} = 2(m_1 + m_2)\sqrt{gL} \cdot \frac{1}{2} \cos(\beta / 2)$ вычисляются при средних значениях $\langle m_1 \rangle, \langle m_2 \rangle, \langle L \rangle, \langle g \rangle, \langle \alpha \rangle, \langle \beta \rangle$ прямо измеренных величин. Обратите внимание на то, что величина $\Delta \beta$ должна быть представлена в радианах, а не в градусах.

Вычислить относительные погрешности импульсов системы шаров до и после *неупругого* столкновения по формулам:

$$\begin{cases} \varepsilon_p = \frac{\Delta p}{\langle p \rangle} \cdot 100 \% ; \\ \varepsilon_{p'} = \frac{\Delta p'}{\langle p' \rangle} \cdot 100 \% . \end{cases} \quad (4.5)$$

Записать окончательный результат (с учетом правил округления) в виде:

$$\begin{cases} p = \langle p \rangle \pm \Delta p \text{ (кг} \cdot \text{м/с)} & \text{с } \varepsilon_p = \dots \% & \text{при } \alpha = 0,95; \\ p' = \langle p' \rangle \pm \Delta p' \text{ (кг} \cdot \text{м/с)} & \text{с } \varepsilon_{p'} = \dots \% & \text{при } \alpha = 0,95. \end{cases} \quad (4.6)$$

Лабораторная работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ ВОЗДУХА

5.1. Теоретический блок

Лабораторная установка (рис. 5.1) состоит из стеклянного сосуда 1, соединенного с водяным манометром 2 и ручным насосом 3 (резиновой «грушей»).

Стеклянный сосуд с помощью трехходового крана 4 может соединяться с ручным насосом (резиновой «грушей») и манометром (положение 1) либо с манометром и атмосферой (положение 2), либо с ручным насосом и атмосферой (нерабочее положение).

Измеряя разность уровней h_1 и h_2 воды в манометре по показаниям манометра до и после быстрого выхода воздуха из сосуда, можно вычислить показатель адиабаты для воздуха по формуле:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (5.1)$$

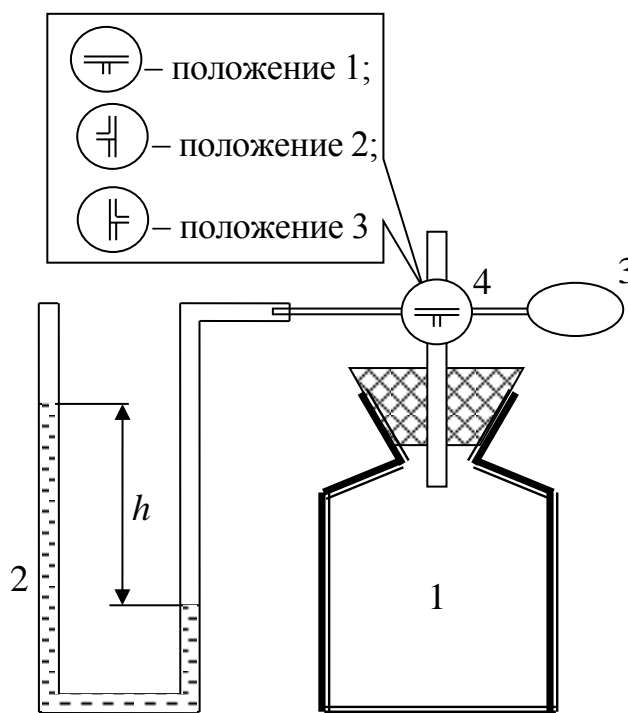


Рис. 5.1. Схема установки

5.2. Практико-вычислительный блок

1) Установить трехходовой кран в положение 1 (см. рис. 5.1) и накачать воздух в сосуд до тех пор, пока разность уровней воды в манометре не будет максимальной. Пережать зажимом резиновый шланг от насоса и подождать 2 – 3 мин, пока температура воздуха в сосуде не станет равной температуре окружающей среды (давление в сосуде перестанет меняться). После этого измерить разность уровней h_1 воды в манометре, результат измерения записать в таблицу (см. стр. 5).

2) Резко повернуть трехходовой кран по ходу часовой стрелки в положение 2. Характерный шипящий звук свидетельствует о том, что воздух очень быстро выходит из сосуда, а давление в сосуде понижается. В тот момент, когда уровни воды в коленах манометра сравняются, вернуть кран в положение 1. При этом давление в сосуде станет равным атмосферному, а температура в нем понизится. Через 2 – 3 мин воздух, охлажденный при адиабатическом расширении, нагреется до температуры окружающей среды. Давлению воздуха в этом состоянии будет соответствовать показание манометра h_2 , записать его в таблицу.

3) Провести многократные (не менее трех раз) измерения. Результаты измерения занести в таблицу.

4) Произвести оценочный (приблизительный) расчет показателя адиабаты по формуле (5.1) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

5) Математическую обработку результатов измерений сделать по одному из двух вариантов (первый путь обработки результатов измерений логически более предпочтителен, однако второй проще):

если первоначальное показание манометра h_1 на установке *можно воспроизвести* (в пределах инструментальной погрешности манометра добиться одинакового значения h_1 для всех произведенных опытов), то математическая обработка результатов измерений должна быть выполнена по правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *воспроизводимы* (см. п. 5.3.1);

если на лабораторной установке первоначальный результат h_1 *не воспроизводится*, то следует провести многократные измерения различных показаний h_{1i} и h_{2i} манометра, рассчитывая *каждый раз* значение γ_i по формуле (5.1). После этого необходимо выполнить математическую обработку результатов измерений по *правилам* обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *невоспроизводимы* (см. п. 5.3.2).

6) Вычислить теоретическое значение γ для воздуха по формуле $\gamma = (i + 2)/i$, где i – число степеней свободы газа, полагая, что воздух является двухатомным газом ($i = 5$).

7) Сравнить полученный экспериментальный и теоретический результаты с табличными данными ($\gamma_{\text{возд}} = 1,4$) и сделать вывод.

8) Выполнить задания он-лайн курса (см. стр. 6).

5.3. Блок расчета погрешностей

5.3.1. Условия эксперимента воспроизводимы

В этом случае необходимо выполнить математическую обработку результатов прямых измерений величин, входящих в формулу (5.1).

Вычислить среднее значение $\langle \gamma \rangle$ показателя адиабаты по формуле (5.1), подставив в нее средние значения $\langle h_1 \rangle$ и $\langle h_2 \rangle$ прямо измеренных величин.

Рассчитать абсолютную и относительную погрешности показателя адиабаты. В данном случае проще сначала вычислить абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial h_1} \cdot \Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial h_2} \cdot \Delta h_2\right)^2}, \quad (5.2)$$

где частные производные $\frac{\partial\gamma}{\partial h_1} = -\frac{\langle h_2 \rangle}{(\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)^2}$; $\frac{\partial\gamma}{\partial h_2} = \frac{\langle h_1 \rangle}{(\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)^2}$ вычисляются при средних значениях $\langle h_1 \rangle$, $\langle h_2 \rangle$ прямо измеренных величин.

Рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{\Delta\gamma}{\langle \gamma \rangle} \cdot 100 \%. \quad (5.3)$$

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma \quad \text{с} \quad \varepsilon_\gamma = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (5.4)$$

5.3.2. Условия эксперимента невоспроизводимы

Для второго пути необходимо для каждого из значений h_{1i} и h_{2i} , вычис-

лить значение γ_i :

$$\gamma_i = \frac{h_{1i}}{h_{1i} - h_{2i}}. \quad (5.5)$$

Определить среднее значение измеряемой величины:

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{n}. \quad (5.6)$$

Рассчитать случайную погрешность измерений:

$$\Delta\gamma_{\text{сл}} = t_{\alpha;n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\langle \gamma \rangle - \gamma_i)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (5.7)$$

Вычислить погрешность, вносимую различными инструментами в абсолютную погрешность косвенно измеряемой величины (назовем формально эту погрешность инструментальной):

$$\Delta\gamma_{\text{ин}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial h_1} \cdot \Delta h_{\text{ин1}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial h_2} \cdot \Delta h_{\text{ин2}} \right)^2}, \quad (5.8)$$

где частные производные $\frac{\partial \gamma}{\partial h_1} = -\frac{\langle h_2 \rangle}{(\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)^2}$; $\frac{\partial \gamma}{\partial h_2} = \frac{\langle h_1 \rangle}{(\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)^2}$ вычисляются при средних значениях $\langle h_1 \rangle$, $\langle h_2 \rangle$ прямо измеренных величин.

При этом после нахождения частных производных в выражение (5.8) следует подставить наименьшие из измеренных значений h_1 , h_2 , приводящие к наибольшей погрешности $\Delta\gamma_{\text{ин}}$.

Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta\gamma_{\text{сл}})^2 + (\Delta\gamma_{\text{ин}})^2}. \quad (5.9)$$

Рассчитать относительную погрешность по формуле (5.3).

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma \quad \text{с} \quad \varepsilon_\gamma = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (5.10)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОДЫ

6.1. Теоретический блок

Лабораторная установка (рис. 6.1) включает в себя сосуд 1 с водой с нанесенной на его поверхность шкалой 2 для измерения объема вытекшей воды (в сантиметрах в кубе), водяной манометр 3, капилляр 4 и кран 5, с помощью которого можно регулировать скорость течения воды по капилляру.

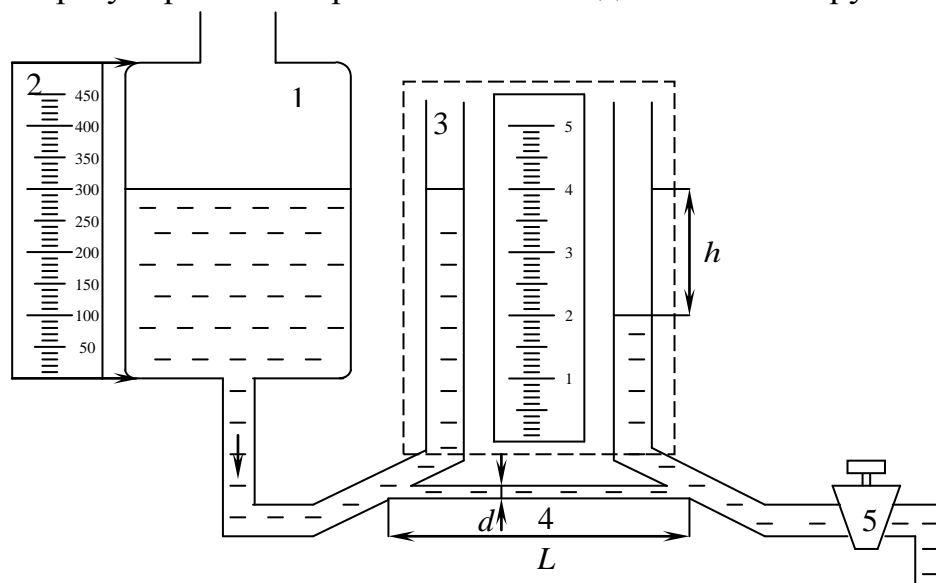


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки

Коэффициент вязкости воды можно вычислить, измерив время t , за которое из сосуда вытекает вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и объемом V , а также этот объем V и разность уровней h воды в водяном манометре, имеющем диаметр d и длину L капилляра, указанные на лабораторной установке, по формуле:

$$\eta = \frac{\pi d^4 t \rho g h}{128 L V}, \quad (6.1)$$

где g – ускорение свободно падающего тела, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

6.2. Практико-вычислительный блок

- 1) Закрывать кран 5 и заполнить сосуд 1 (см. рис. 6.1) водой до отметки не менее 500 см^3 . Под кран подставить пустую емкость (стакан).
- 2) Плавно открыть кран и добиться такой скорости вытекания воды, чтобы разность уровней h воды в водяном манометре 3 не превышала 20 мм. По заданию преподавателя установить требуемую разность уровней.

3) С помощью секундомера измерить время t вытекания из сосуда воды объемом V (рекомендуемый объем вытекающей жидкости – 50 см^3). При этом, как только из сосуда вытечет половина заданного объема воды (25 см^3), измерить разность уровней h воды в водяном манометре. Результаты измерения объема V вытекшей воды, времени t вытекания воды и разности уровней h воды в водяном манометре, а также значения их инструментальной погрешности занести в таблицу (см. стр. 5).

4) С помощью термометра измерить температуру T воды. Результат измерения, а также указанные на лабораторной установке диаметр d и длину L капилляра и значения их погрешности занести в таблицу.

5) Провести измерения (п. 1 – 3) не менее трех раз. Результаты измерения занести в таблицу.

6) Произвести оценочный (приблизительный) расчет коэффициента вязкости воды по формуле (6.1) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

7) Математическую обработку результатов измерений сделать по одному из двух вариантов:

если первоначальное показание манометра h на установке *можно воспроизвести* (в пределах инструментальной погрешности манометра), то математическая обработка результатов измерений должна быть выполнена по правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *воспроизводимы* (см. п. 6.3.1);

если на лабораторной установке первоначальный результат h *не воспроизводится*, то следует провести многократные измерения различных показаний h_i манометра, рассчитывая *каждый раз* значение η_i по формуле (6.1). Затем необходимо выполнить математическую обработку результатов измерений по правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *невоспроизводимы* (см. п. 6.3.2).

8) Сравнить полученный результат с табличным значением (см. подразд. 6.3) и сделать вывод.

9) Выполнить задания он-лайн курса (см. стр. 6).

6.3. Блок расчета погрешностей

6.3.1. Условия эксперимента воспроизводимы

Необходимо выполнить математическую обработку результатов прямых измерений величин, входящих в формулу (6.1). Вычислить среднее значение

$\langle \eta \rangle$ коэффициента вязкости по формуле (6.1), подставив в нее средние значения прямо измеренных величин.

Рассчитать абсолютную и относительную погрешности коэффициента вязкости. В данном случае проще сначала вычислить относительную погрешность по формуле

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{(4\varepsilon_d)^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_g^2 + \varepsilon_h^2 + \varepsilon_L^2 + \varepsilon_V^2}, \quad (6.2)$$

а затем определить абсолютную погрешность $\Delta\eta$ по формуле $\Delta\eta = \varepsilon_{\eta} \langle \eta \rangle$.

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta \text{ (Па} \cdot \text{с)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_{\eta} = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (6.3)$$

6.3.2. Условия эксперимента невоспроизводимы

Необходимо для каждого из значений t_i и h_i вычислить значение η_i :

$$\eta_i = \frac{\pi d^4 t \rho g h}{128 L V}. \quad (6.4)$$

Определить среднее значение измеряемой величины:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{n}. \quad (6.5)$$

Рассчитать случайную погрешность измерений:

$$\Delta\eta_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\langle \eta \rangle - \eta_i)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (6.6)$$

Вычислить погрешность, вносимую различными инструментами в абсолютную погрешность косвенно измеряемой величины (назовем формально эту погрешность инструментальной):

$$\Delta\eta_{\text{ин}} = \langle \eta \rangle \cdot \sqrt{(\varepsilon_{\pi})^2 + (4 \cdot \varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_g)^2 + (\varepsilon_h)^2 + (\varepsilon_L)^2 + (\varepsilon_V)^2}, \quad (6.7)$$

где $\varepsilon_{\pi} = \frac{\Delta\pi}{\pi}$; $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$; $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$; $\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g}$; $\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h}$; $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$; $\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V}$ – относительные погрешности величин, входящих в формулу (6.1).

Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta\eta = \sqrt{(\Delta\eta_{\text{сл}})^2 + (\Delta\eta_{\text{ин}})^2}. \quad (6.8)$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\langle \eta \rangle} \cdot 100 \%. \quad (6.9)$$

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta \text{ (Па} \cdot \text{с)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_{\eta} = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (6.10)$$

Таблица 6.1

Коэффициенты вязкости воды

Температура	20°C	25°C	30°C
Коэффициент вязкости воды η при данной температуре	1,002 мПа·с	0,894 мПа·с	0,7978 мПа·с

Лабораторная работа 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

7.1. Теоретический блок

Лабораторная установка (рис. 7.1) состоит из сосуда 1, крана 2 для выпуска жидкости из сосуда в стакан 3, капилляра 4, соединенного с сосудом, и водяного манометра 5.

После открывания крана жидкость начинает вытекать из сосуда в стакан, а воздух поступает в сосуд по капилляру. При этом давление на концах капилляра неодинаковое. Разность этих давлений измеряется водяным манометром.

Измерив время t , за которое из сосуда вытекает вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, объемом V , а также этот объем V и разность уровней h воды в водяном манометре, можно вычислить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул по формулам:

$$l = \frac{3\pi d^4 t \rho g h}{256 V L P} \sqrt{\frac{\pi R T}{2M}}; \quad (7.1)$$

$$D = \sqrt{\frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \ell P}}, \quad (7.2)$$

где g – ускорение свободно падающего тела, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

d и L – диаметр капилляра и его длина соответственно (указаны на лабораторной установке), мм;

P – давление воздуха, Па;

T – абсолютная температура воздуха, К;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$;

k_B – постоянная Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$;

M – молярная масса воздуха, $M = 0,029 \text{ кг/моль}$.

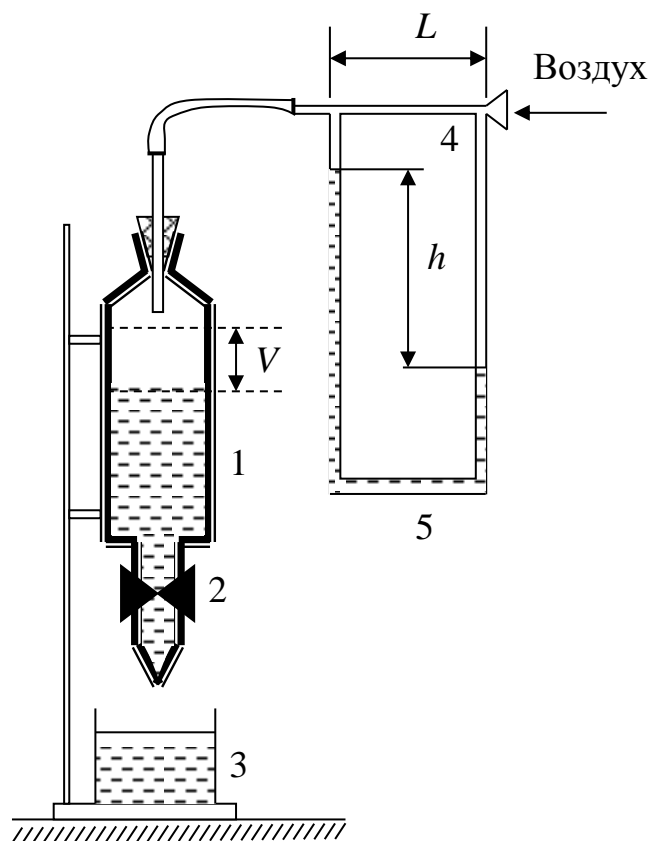


Рис. 7.1. Схема лабораторной установки

7.2. Практико-вычислительный блок

1) При закрытом кране 2 заполнить сосуд 1 (см. рис. 7.1) водой до отметки не менее 500 см^3 и *плотно закрыть* его пробкой. Под кран подставить стакан 3.

2) Плавно открыть кран и добиться такой скорости вытекания воды, чтобы разность уровней h воды в водяном манометре 5 *не превышала* 20 мм. По заданию преподавателя установить требуемую разность уровней.

3) С помощью секундомера измерить время t вытекания из сосуда воды объемом V (рекомендуемый объем вытекающей воды – 100 см^3). При этом, как только из сосуда вытечет половина заданного объема воды (50 см^3), измерить разность уровней h воды в водяном манометре. Результаты измерения объема V вытекшей воды, времени t вытекания воды и разности уровней h воды в водяном манометре, а также значения их инструментальной погрешности занести в таблицу (см. стр. 5).

4) Измерить температуру T и давление P воздуха с помощью термометра и барометра соответственно. Результаты измерения и значения их инструменталь-

ной погрешности занести в таблицу, также в нее занести указанные на лабораторной установке диаметр d , длину L капилляра и значения их погрешности.

5) Провести измерения (п. 1 – 3) не менее трех раз. Результаты измерения занести в таблицу.

6) Произвести оценочный (приблизительный) расчет средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул по формулам (7.1) и (7.2), результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

7) Математическую обработку результатов измерений сделать по одному из двух вариантов:

если первоначальное показание манометра h на установке *можно воспроизвести* (в пределах инструментальной погрешности манометра), то математическая обработка результатов измерений должна быть выполнена по правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *воспроизводимы* (см. п. 7.3.1);

если на лабораторной установке первоначальный результат h *не воспроизводится*, то следует провести многократные измерения различных показаний h_i манометра, рассчитывая *каждый раз* значения l_i по формуле (7.1). Затем необходимо выполнить математическую обработку результатов измерений по правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента *невоспроизводимы* (см. п. 7.3.2).

8) Сравнить полученные результаты с табличными значениями и сделать вывод.

9) Выполнить задания он-лайн курса (см. стр. 6).

7.3. Блок расчета погрешностей

7.3.1. Условия эксперимента воспроизводимы

Необходимо выполнить математическую обработку результатов прямых измерений величин, входящих в формулы (7.1) и (7.2).

Вычислить средние значения средней длины свободного пробега $\langle l \rangle$ и эффективного диаметра молекул $\langle D \rangle$ по формулам (7.1) и (7.2), подставив в них средние значения прямо измеренных величин.

Рассчитать абсолютные и относительные погрешности средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул. В данном случае проще сначала вычислить относительные погрешности средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул по формулам

$$\varepsilon_l = \sqrt{\varepsilon_\pi^2 + (4\varepsilon_d)^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_g^2 + \varepsilon_h^2 + \varepsilon_V^2 + \varepsilon_L^2 + \varepsilon_P^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_T^2\right)}; \quad (7.3)$$

$$\varepsilon_D = \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_\pi^2 + \varepsilon_l^2 + \varepsilon_P^2}, \quad (7.4)$$

а затем определить абсолютные погрешности по формулам $\Delta l = \varepsilon_l \langle l \rangle$ и $\Delta D = \varepsilon_D \langle D \rangle$.

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$l = \langle l \rangle \pm \Delta l \text{ (м)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_l = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95; \quad (7.5)$$

$$D = \langle D \rangle \pm \Delta D \text{ (м)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_D = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (7.6)$$

7.3.2. Условия эксперимента невоспроизводимы

Для расчета погрешностей средней длины свободного пробега молекул $\langle l \rangle$ необходимо для каждого из значений t_i и h_i вычислить значение l_i :

$$l_i = \frac{3\pi d^4 t \rho g h}{256 L V P} \cdot \sqrt{\frac{\pi R T}{2 M}}. \quad (7.7)$$

Определить среднее значение измеряемой величины:

$$\langle l \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{n}. \quad (7.8)$$

Рассчитать случайную погрешность измерений:

$$\Delta l_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\langle l \rangle - l_i)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (7.9)$$

Вычислить погрешность, вносимую различными инструментами в абсолютную погрешность косвенно измеряемой величины (назовем формально эту погрешность инструментальной):

$$\Delta l_{\text{ин}} = \langle l \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{2}\varepsilon_{\pi}\right)^2 + (4\varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_g)^2 + (\varepsilon_h)^2 + (\varepsilon_L)^2 + (\varepsilon_V)^2 + (\varepsilon_P)^2 + \left(\frac{1}{2}\varepsilon_T\right)^2}, \quad (7.10)$$

где $\varepsilon_{\pi} = \frac{\Delta\pi}{\pi}$; $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$; $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$; $\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g}$; $\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h}$; $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$; $\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V}$;
 $\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P}$; $\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T}$ – относительные погрешности величин, входящих в формулы (7.1) и (7.2).

Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta l = \sqrt{(\Delta l_{\text{сл}})^2 + (\Delta l_{\text{ин}})^2}. \quad (7.11)$$

Рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{\langle l \rangle} \cdot 100 \%. \quad (7.12)$$

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$l = \langle l \rangle \pm \Delta l \text{ (м)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_l = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (7.13)$$

Вычислить средние значения эффективного диаметра молекул $\langle D \rangle$ по формуле (7.2), подставив в нее средние значения прямо измеренных величин:

$$\langle D \rangle = \sqrt{\frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} \langle l \rangle P}}. \quad (7.14)$$

Для расчета погрешностей эффективного диаметра молекул $\langle D \rangle$ необходимо определить абсолютную погрешность:

$$\Delta D = \langle D \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2}\varepsilon_T\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\varepsilon_{\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\varepsilon_l\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\varepsilon_P\right)^2}. \quad (7.15)$$

Вычислить относительную погрешность:

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{\langle D \rangle} \cdot 100\%. \quad (7.16)$$

Произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде:

$$D = \langle D \rangle \pm \Delta D \text{ (м)} \quad \text{с} \quad \varepsilon_D = \dots \% \quad \text{при} \quad \alpha = 0,95. \quad (7.17)$$

Таблица 7.1

Средняя длина свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Средняя длина свободного пробега молекул воздуха $\langle l \rangle$ при давлении 101,3 кПа и температуре 27° С	0,10 мкм
Эффективный диаметр молекул воздуха	0,30 нм

Библиографический список

1. Литневский, Л. А. Обработка экспериментальных результатов в лабораторном практикуме по физике : учебное пособие / Л. А. Литневский, Ю. М. Сосновский. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. – 30 с. – Текст : непосредственный.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие / Т. И. Трофимова. – Москва : Академия, 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.
3. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2008. – 720 с. – Текст : непосредственный.
4. Оселедчик Ю. С. Физика : учебное пособие / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. – Москва : Юрайт, 2012. – 525 с. – Текст : непосредственный.
5. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва : Наука, 1985. – 512 с. – Текст : непосредственный.

Учебное издание

ЛАПИНА Анастасия Сергеевна, ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич,
МИНЖАСАРОВ Марат Хайргельдаевич, СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО РАЗДЕЛАМ «МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Редактор Н. А. Майорова

Подписано в печать 29.06.2023. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 30 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПС
Типография ОмГУПС

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35