



*Федеральное агентство по рыболовству Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»*

Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций
сертифицирована ООО «ДКС РУС» по международному стандарту ISO 9001:2015

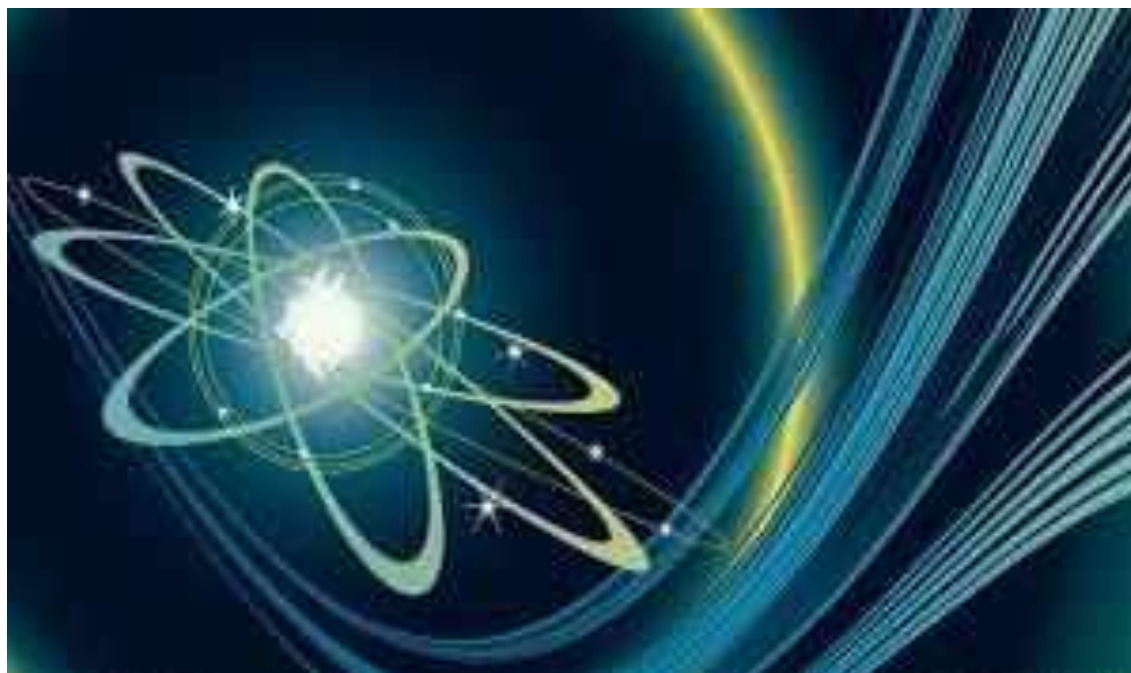
Институт Морских Технологий
Энергетики и Транспорта
Кафедра «Общеинженерные дис-
циплины и наземный транспорт»

**Механика. Молекулярная физика. Термодинамика.
Электричество. Магнетизм. Оптика (ауд.1.309)**

Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Физика» для направлений подготовки

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

*13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
очная и очно-заочная формы обучения*



Астрахань 2025

Составитель:

канд. пед. наук, доц. Быкова В.П.

Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электричество. Магнетизм. Оптика : учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» : для направлений подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника очной и очно-заочной форм обучения / составитель В. П. Быкова ; Астраханский государственный технический университет, Институт морских технологий, энергетики и транспорта, Кафедра «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт». – Астрахань, 2025. – 125 с.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. кафедры «Физика» Ревина А.В.

Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» «Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электричество. Магнетизм. Оптика» утверждены на заседании кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт» (протокол № 01 от 15.01.2025 г.) и рекомендованы к внутривузовскому изданию.

В пособии использованы лабораторные работы, предложенные Модульным учебным комплексом (раздел «Механика») МУК-1; Лабораторным комплексом ЛКТ-2 (разделы «Молекулярная физика. Термодинамика»; Лабораторным стендом «Электричество и магнетизм» ЭиМ02-Р; Лабораторным комплексом ЛКО-3П (раздел «Оптика»)

Содержание

Содержание конспекта отчета по лабораторной работе.....	4
Механика.	
Лабораторная работа № 0 Методические рекомендации к выполнению физического практикума.....	8
Лабораторная работа № 1 Определение плотности твердого тела правильной геометрической формы.....	15
Лабораторная работа № 2 Изучение закона сохранения импульса.....	21
Лабораторная работа № 3 Изучение закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека.....	27
Лабораторная работа № 4 Проверка закона сохранения момента импульса...	32
Лабораторная работа № 5 Определение ускорения свободного падения с помощью обратного и математического маятников.....	38
Лабораторная работа № 6 Описание Модульного комплекса («Механика») МУК-1. Измерение скорости пули с помощью баллистического маятника ...	42
Молекулярная физика и термодинамика.	
Лабораторная работа № 7 Описание комплекса ЛКТ-2.....	47
Лабораторная работа № 8 Изучение и применение изотермического процесса. Проверка закона Бойля-Мариотта.....	51
Лабораторная работа № 9 Определение размеров молекул по площади пятна.....	60
Лабораторная работа № 10 Теплота плавления, приращение энтропии.....	67
Лабораторная работа № 11 Теплопроводность воздуха при постоянном давлении.....	74
Электричество. Магнетизм.	
Лабораторная работа №12 Описание лабораторного комплекса «Электричество и магнетизм» ЭиМ-Р.....	82
Лабораторная работа №13 Определение емкости конденсатора.....	90
Оптика.	
Лабораторная работа №14 Описание лабораторного оптического комплекса ЛКО-ЗП.....	98
Лабораторная работа №15 Измерение показателей преломления твердых тел.....	105
Лабораторная работа №16 Измерение показателя преломления прозрачных веществ с помощью микроскопа.....	111
Лабораторная работа №17 Определение концентрации сахара в растворе с помощью поляриметра.....	117
Список использованной литературы.....	125

Содержание конспекта отчета по лабораторной работе

1. Титульный лист по образцу.
2. Цель лабораторной работы.
3. Оборудование.
4. Ответы на контрольные вопросы.
5. После каждого пункта в выполнении лабораторной работы необходимо:
 - начертить схему или рисунок установки (с надписью и пояснением всех входящих в схему элементов), а также рисунки, поясняющие вывод рабочих формул;
 - начертить таблицы и заполнить их;
 - записать основные расчетные формулы, с обязательным пояснением величин, входящих в формулу, выполнить расчеты;
 - если требуется по заданию выполнить графики и диаграммы или поместить их фотографию с компьютера;
 - сделать вывод по лабораторной работе.

Вывод по лабораторной работе

Выводы по лабораторной работе – кратко сформулированные итоги обработки результатов измерений. В выводах должна быть отображена следующая информация:

- каким методом измерялись физические величины;
- какие графики были построены;
- какие результаты были получены.

Также выводы должны содержать обсуждение построенных графиков и полученных результатов: совпадает или нет вид экспериментальных графиков с теоретическими предсказаниями, совпадают или нет результаты эксперимента с теорией.

Требования к построениям графиков:

- **графики выполняются карандашом на миллиметровой бумаге или на компьютере;**
- при выполнении графиков используется прямоугольная система координат с равномерной разметкой осей; **горизонтальная ось отводится аргументу, т.е. величине, значение которой задает сам экспериментатор, а вертикальная ось – функции, в конце каждой оси указывают символ величины, десятичный множитель и единицу величины;**
- масштаб и начало координат выбираются так, чтобы экспериментальные точки располагались по всей площади рисунка;
- рядом с осью дается буквенное обозначение, порядок и размерность физической величины;
- под графиком название графика; **проведение экспериментальной кривой проводят тонкой плавной, непрерывной линией, чтобы точки находились равномерно по обе стороны кривой как можно ближе к ней.**

Определение параметров линейной зависимости

Рассмотрим приближенный метод определения параметров прямой. Пусть измеренные величины x и y связаны линейной зависимостью вида $y = Kx + b$ и нужно определить ее параметры K и b . Для этого опытные точки наносят на график и проводят прямую линию, руководствуясь правилами построения графика. На концах линии выбирают две произвольные точки a и b , удобные для расчета. Для простоты расчета и снижения погрешности отсчета по графику удобно точку a взять на одной из осей, а точку b - так, чтобы при расчете K отрезок $(x_b - x_a)$ позволял обойтись без микрокалькулятора.

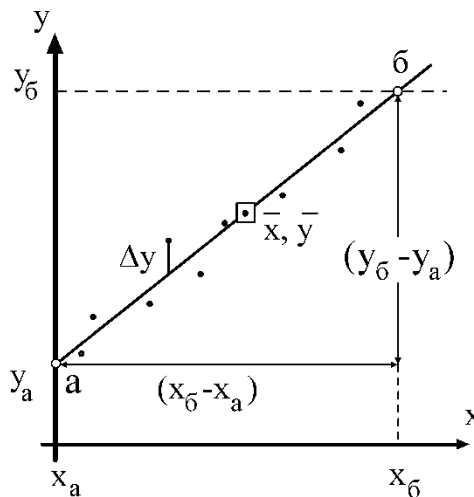


Рисунок 1 — Определение параметров прямой

Среднее значение углового коэффициента K вычисляют как отношение, определяющее наклон прямой:

$$\bar{K} = \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \quad (1)$$

Параметр b линейной зависимости находят по графику как ординату точки пересечения прямой с осью Y . Величину b можно найти и по уравнению прямой, подставляя координата средней точки графика:

$$b = \bar{y} - K\bar{x} \quad (2)$$

Случайные погрешности параметров определяются разбросом опытных точек относительно проведенной прямой. Для простейшей оценки этих погрешностей достаточно найти на графике величину Δy - отклонение от прямой линии наиболее удаленной точки, и $(y_N - y_1)$ - интервал, на котором сделаны измерения (длина оси y). Абсолютная случайная погрешность параметра b

$$\Delta_b = \Delta_y \quad (3)$$

Для углового коэффициента прямой K сначала вычисляют относительную погрешность

$$\delta_K = \frac{\Delta_y}{(y_N - y_1)} \quad (4)$$

Формула (4) привлекает тем, что при расчете отношения одного рода можно взять их в любых единицах (всего удобнее - в миллиметрах шкалы по оси y). Напомним, что в величине погрешностей имеет значение, как правило, одна цифра, а потому достаточная точность отсчета отрезка $(y_N - y_1)$ - "круглое число", например, 90, 100, или 120 мм.

Затем находят абсолютную погрешность величины K

$$\Delta_K = K\delta_K \quad (5)$$

которая позволяет записать доверительный интервал для искомого параметра K :

$$K = K \pm \Delta_K \quad (6)$$

Доверительная вероятность P в описанном методе оценки погрешностей (по максимальному отклонению Δy) зависит от числа опытных точек N - чем больше N , тем выше надежность результата:

$$P = 1 - (1/2)^{N-1} \quad (7)$$

ОФОРМЛЕНИЕ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА



*Федеральное агентство по рыболовству Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»*

Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций
сертифицирована ООО «ДКС РУС» по международному стандарту ISO 9001:2015

Кафедра «Общеинженерные
дисциплины и наземный транспорт»

Отчет
по лабораторной работе №

« _____ »
_____»

Выполнил студент группы

_____ (Ф.И.О.)

Преподаватель (уч. ст., звание)

_____ (Ф.

	дата	подпись
допуск		
результаты		
отчет		

Лабораторная работа № 0

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Краткая теория. Виды измерений

В эксперименте свойства физических явлений и объектов изучаются с помощью измерений соответствующих физических величин. Измерить какую-либо физическую величину значит сравнить ее с другой однородной ей физической величиной, принятой за единицу меры. Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений и т.д. Классификация видов измерений приведена на рис.1. Несмотря на то, что существует множество видов измерений, число их постоянно увеличивается. По количеству проводимых опытов, например, измерения можно разделить на многократные и однократные. Измерения называют **однократными**, когда для получения значения некоторой физической величины в опыте проводят только одно измерение. Измерения называют **многократными**, если для получения значения физической величины выполняют несколько измерений одними и теми же приборами при одних и тех же условиях. По способу получения результата в учебной физической лаборатории обычно выделяют прямые (непосредственные) и косвенные измерения. При **прямых измерениях** искомое значение физической величины определяют соответствующим физическим прибором (непосредственное сравнение с эталоном). Например, длину измеряют непосредственно линейкой, температуру – термометром, силу – динамометром и т.д. Если искомое значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, найденными прямыми измерениями, то этот вид измерений называют **косвенными**. Например, объем параллелепипеда может быть найден путем умножения трех линейных величин (длины, ширины и высоты), которые в свою очередь измеряются непосредственно.



Рисунок 1 – Классификация методов измерений

По условиям измерений различают равноточные и неравноточные измерения. Если измерения какой-либо физической величины выполняются одинаковыми по точности приборами в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью, такие измерения считают **равноточными**. Измерения, выполненные различающимися по точности приборами и (или) при разных условиях, называют **неравноточными**. В учебной физической лаборатории, как правило, все измерения являются равноточными. Это связано с фиксированным набором приборов и ограниченным временем выполнения работ лабораторного практикума.

В соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1, **измерения**, проводимые **при выполнении лабораторных работ** можно характеризовать как **равноточные, многократные или однократные, прямые или косвенные**, выполняемые с использованием различных методов измерений.

Лабораторные измерения всегда обладают некоторой неточностью (погрешностью), оценка которой является неотъемлемой составляющей любого экспериментального исследования.

Погрешности измерений

Эксперимент показывает, что вследствие неточности измерительных приборов, несовершенства наших органов чувств, неполноты наших знаний, трудности учета всех побочных явлений, при многократном повторении одного и того же измерения получаются разные числовые значения изучаемой физической величины. Так бывает, даже если измерения производить в совершенно одинаковых условиях (равноточные измерения). При практическом использовании результатов тех или иных измерений возникает вопрос об истинном значении изучаемой физической величины, о точности измерения.

Термин «**точность измерения**», т.е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, используется для качественного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки используется понятие «**погрешность (ошибка) измерений**». Эти термины тесно связаны друг с другом: чем меньше погрешность, тем выше точность. Оценка погрешности измерений – одно из важных мероприятий по обеспечению достоверности измерений.

Количество факторов, влияющих на точность измерений, достаточно велико, и любая классификация погрешностей измерений в известной мере условна. На схеме, изображенной на рисунке 2, приведена одна из возможных классификаций, которая может служить основой для оценки погрешности измерений в учебной физической лаборатории.

Рассмотрим некоторые виды погрешностей подробнее.

Обозначим через x результат измерения некоторой величины, а через x_0 - истинное значение ее, которое всегда нам неизвестно. Погрешность измерения – это отклонение результата измерений x от истинного x_0 (действительного) значения измеряемой величины.

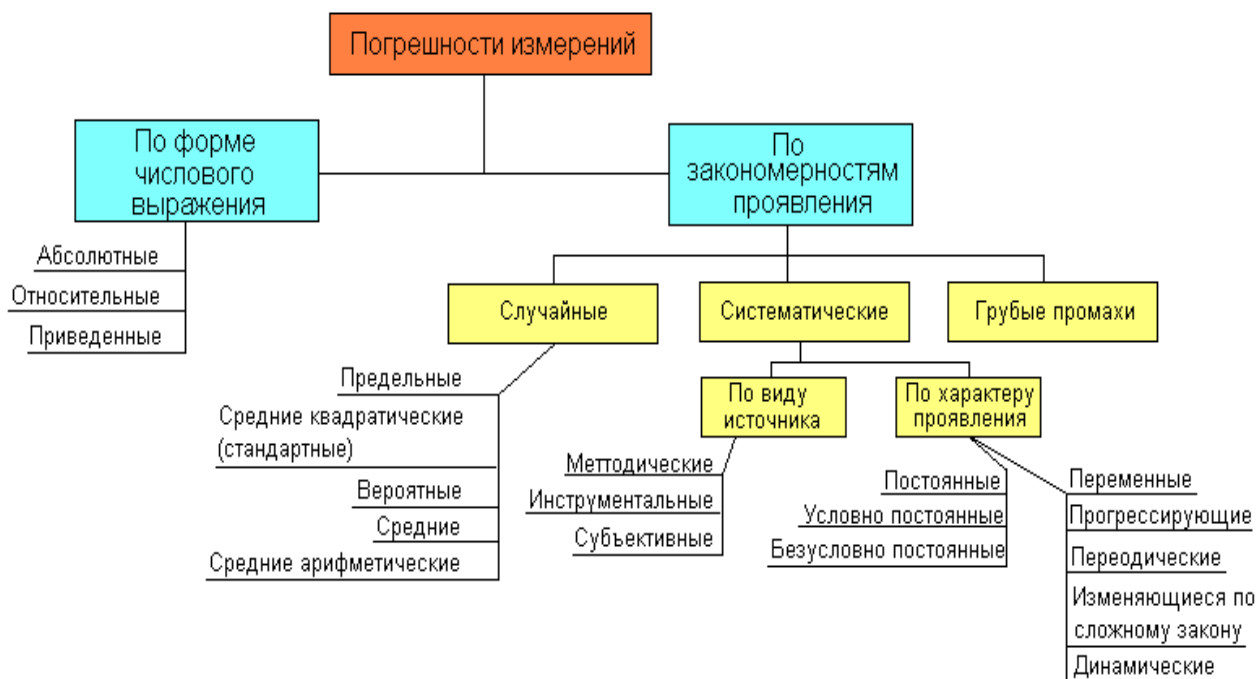


Рисунок 2 – Классификация погрешностей для оценки измерений в учебной физической лаборатории

В зависимости от формы представления различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерений.

Абсолютная погрешность измерения определяется как разность $|x - x_0| = \Delta x$ между истинным и измеренным значениями физической величины. Абсолютная погрешность может быть положительной или отрицательной в зависимости от того уменьшен или увеличен результат измерения по отношению к истинному значению.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к истинному значению или к результату измерения. Относительная погрешность чаще всего выражается в процентах:

$$\varepsilon = \delta = \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \delta = \pm \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\%.$$

Приведенная погрешность – отношение абсолютной погрешности к нормированному значению x_n , выраженное в процентах $\gamma = \pm \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\%$. В качестве нормированного значения может быть взято, например, максимальное значение $x_{\max}$ измеряемой величины $x_n = x_{\max}$.

В зависимости от характера проявления, причин возникновения и возможностей устранения различают систематическую и случайную составляющую погрешности измерения, а также грубые погрешности (промахи).

Систематические погрешности (ошибки) – это погрешности, которые сохраняют величину и знак от опыта к опыту, при равноточных измерениях. Типичными источниками систематических погрешностей бывают:

- несовершенство используемой измерительной аппаратуры;
- несовершенство используемого метода измерений;
- плохая настройка измерительной аппаратуры;
- недостаточное постоянство условий опыта;
- влияние окружающей среды;
- постоянные ошибки экспериментатора;
- неучтенные влияния других параметров.

Систематические погрешности считаются потенциально устранимыми. Чтобы избежать или уменьшить систематические погрешности необходимо критически относиться к методам исследования, совершенствуя их, применяя более точные приборы, следя за их исправностью и т.д.

Случайные погрешности (ошибки) – это погрешности, изменяющие свою величину или знак от опыта к опыту, при измерениях, выполненных одинаковым образом и при одинаковых условиях. Случайные погрешности обуславливаются большим числом случайных причин, действующих в каждом отдельном измерении различным, неизвестным образом. К числу таких причин относятся случайные вибрации отдельных частей прибора, различные изменения в среде (температурные, оптические, электрические, магнитные воздействия, изменение влажности, колебание воздуха), трение, физиологическое изменение органов чувств экспериментатора (например, утомление) и множество других причин, которые практически невозможно исключить. Предсказать величину случайной погрешности для одного измерения в принципе невозможно. Поэтому приходится повторять измерения до определенного разумного предела, а полученную совокупность экспериментальных результатов обрабатывать с помощью методов теории вероятностей и математической статистики, которые являются основой, так называемой, теории погрешностей.

Промахи или грубые погрешности (ошибки) – это ошибочные измерения или наблюдения, возникающие в результате небрежности при отсчете по прибору или неразборчивой записи показаний, при неправильном включении прибора, или при нарушении условий, в которых должен проводиться опыт (изменение напряжения, загрязнение материала и т.д.). Такие ошибочные данные следует отбросить или сделать повторные (контрольные) измерения.

Если влияния систематических погрешностей и грубых промахов на полученные в эксперименте результаты, так или иначе, можно избежать или уменьшить, то случайные погрешности являются неустраняемыми. Поэтому познакомимся с основными методами оценки случайной погрешности при равноточных измерениях различного вида в лабораторном практикуме.

Способы определения приборных ошибок

Погрешность однократных измерений определяется характеристиками используемых в эксперименте приборов. Основными характеристиками измерительных приборов, влияющими на погрешность выполняемых с их помощью измерений, являются предел измерения и цена деления. Для электроизмерительных приборов важной величиной также является класс точности прибора.

Предел измерения (Π) – это максимальное значение величины, которое может быть измерено с помощью данной шкалы прибора. Если предел измерения не указан отдельно, то его определяют по оцифровке прибора.

Цена деления ($\mathcal{C}$) – значение измеряемой величины, соответствующее самому малому делению шкалы. Если шкала начинается с нуля, то $\mathcal{C} = \frac{\Pi}{N}$, где N – общее количество делений шкалы. Например, если шкала имеет $N = 50$ делений и принадлежит амперметру с пределом измерений 5 А, то цена деления равна $5/50=0,1(\text{А})$.

Многие электроизмерительные приборы имеют несколько пределов измерения. При переключении с одного предела на другой изменяется и цена деления прибора.

Класс точности прибора (K) представляет собой отношение абсолютной приборной погрешности Δx к пределу измерения шкалы Π , выраженное в процентах: $K = \frac{\Delta x}{\Pi} \cdot 100\%$

Значение класса точности (без символа %) указывается, как правило, на электроизмерительных приборах. Электроизмерительные приборы, используемые и при выполнении лабораторных работ, могут иметь класс точности 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0. Более грубые приборы обозначения класса точности не имеют.

Обработка результатов прямых измерений

1. Результаты каждого измерения записываются в таблицу.
2. Вычисляется среднее значение из n измерений

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i.$$

3. Находятся погрешности отдельных измерений

$$\Delta a_i = |\bar{a} - a_i|.$$

4. Вычисляются квадраты погрешностей отдельных измерений $(\Delta a_i)^2$.
5. Если одно (или два) измерение резко отличается по своему значению от остальных измерений, то следует проверить, не является ли оно промахом.
6. Определяется средняя квадратичная погрешность результата серии измерений

$$S_{\langle a \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}.$$

7. Задается значение надежности α .
8. Определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ для заданной надежности α и числа произведенных измерений n (таблица 1.). При числе измерений $2 \leq n \leq 10$ доверительный интервал определяется с помощью распределения Стьюдента.
9. Находятся границы доверительного интервала (погрешность результата измерений) $\Delta a = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\langle a \rangle}$.
10. Окончательный результат записывается в виде $a = \bar{a} \pm \Delta a$.
11. Оценивается относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

Таблица 1 - Значения коэффициента Стьюдента

Число степеней свободы	Надежность α							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,999
1	1,00	1,38	2,0	3,1	6,9	12,7	31,8	636,6
2	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
3	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
4	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
5	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
6	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
7	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
9	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
14	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1
19	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,9
39	0,68	0,85	1,1	1,2	1,7	2,0	2,4	3,5
∞	0,67	0,84	1,0	1,2	1,6	2,0	2,3	3,3

Обработка результатов косвенных измерений

При оценке точности косвенных измерений первоначально получают формулу для относительной погрешности. Для этого данную функциональную зависимость подвергают ряду операций:

- 1) логарифмируют;
- 2) дифференцируют;
- 3) переходят от бесконечно малых приращений dx к конечным Δx ;
- 4) знаки минус заменяют на плюс.

В качестве примера произведем перечисленный выше набор операций с формулой плотности цилиндра $\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{V} = \frac{4\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}$.

$$1) \ln \bar{\rho} = \ln \frac{4\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}$$

$$2) \frac{d\bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{d\bar{m}}{\bar{m}} - \frac{d\pi}{\pi} - \frac{2d\bar{D}}{\bar{D}} - \frac{d\bar{H}}{\bar{H}}$$

$$3) \varepsilon_{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} 100\% = \left(\frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta \bar{H}}{\bar{H}} + 2 \frac{\Delta \bar{D}}{\bar{D}} \right) 100\%.$$

Зная относительную погрешность можно найти *абсолютную погрешность*

измерений по формуле: $\Delta \bar{\rho} = \frac{\varepsilon_{\rho} \bar{\rho}}{100\%}.$

4) Окончательный результат, запишется в виде $\rho = \bar{\rho} \pm \Delta \rho$ (кг/м³).

Значение погрешности следует округлять до двух значащих цифр, если первая является единицей и до одной значащей цифры во всех остальных случаях. Для записи измеренного значения последней записывается цифра того десятичного ряда, который содержит погрешность (таблица 2).

Таблица 2 – Примеры записи результата

Правильно:	Неправильно:	Ошибка:
$1,2 \pm 0,2$	$1,244 \pm 0,2$	Лишние цифры в значении результата
$1,24 \pm 0,03$	$1,2438 \pm 0,0325$	Лишние цифры в значении погрешности
$1,244 \pm 0,014$	$1,244 \pm 0,01$	Грубое округление погрешности
$1,24 \pm 0,03$	$1,24 \pm 3 \cdot 10^{-2}$	Множитель 10^n должен быть общим

Контрольные вопросы

1. Расскажите о классификации видов измерений, приведенных на рис.1.
2. Расскажите о систематических погрешностях (ошибках) измерений.
3. Расскажите о промахах или грубых погрешностях (ошибках) измерений.
4. Расскажите о способах определения приборных ошибок.
5. Какая величина называется абсолютной, относительной и приведенной погрешностями измерений.
6. Расскажите об обработке результатов прямых измерений.
7. Расскажите об обработке результатов косвенных измерений.

Лабораторная работа № 1

Определение плотности твердого тела правильной геометрической формы.

Цель работы: 1) Научиться пользоваться измерительными приборами штангенциркулем, микрометром; 2) Научиться оценивать погрешность измерения.

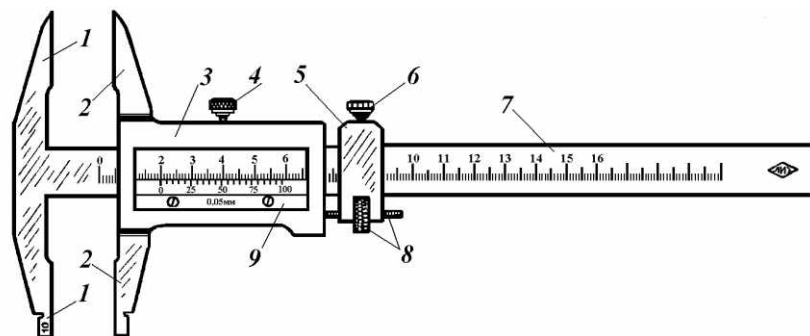
Оборудование: технические весы, штангенциркуль, микрометр, тела правильной геометрической формы.

Краткая теория.

Измерительные инструменты и приборы

Штангенциркуль

Инструмент, имеющий линейный нониус – штангенциркуль. Предназначен штангенциркуль для измерения внутренних и наружных размеров деталей. Конструкции штангенциркулей могут различаться, однако основные элементы являются общими (рисунок 1).



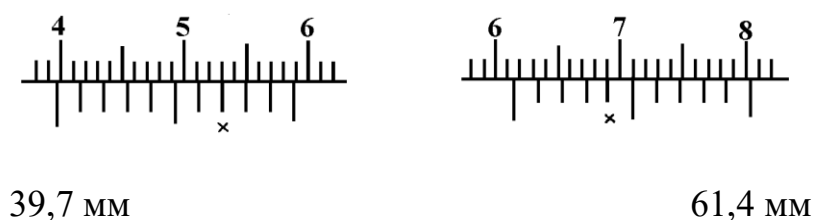
1 – неподвижная измерительная губка, 2 – измерительные губки, 3 – подвижная рамка, 4 – винт, 5 – рамка, 6 – стопорный винт, 7 – стальная линейка,

8 – микрометрическая подача для установки рамки на точный размер, 9 – нониус

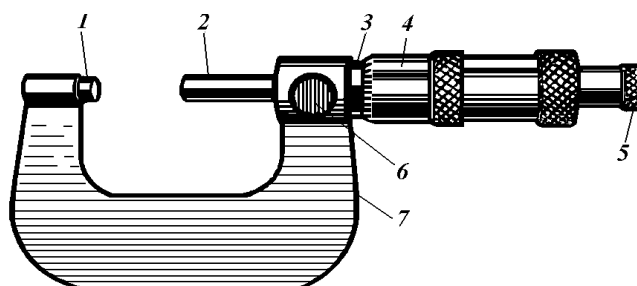
Рисунок 1 – Устройство штангенциркуля

Штангенциркуль (рисунок 1) состоит из стальной линейки 7 с неподвижными измерительными губками 1, между которыми и подвижными измерительными губками 2 зажимается измеряемый предмет. Рамка 3 при помощи винта и гайки микрометрической подачи 8 соединена с рамкой 5, имеющей стопорный винт 6. На нижнем краю рамки 3 нанесены деления нониуса (10 или 20). Когда губки 1 и 2 соприкасаются, нулевые деления линейки и нониуса совпадают. Чтобы измерить длину предмета, его помещают между губками 1 и 2 и сдвигают их до соприкосновения с предметом (но без сильного нажима). Стопорный винт 4 позволяет зафиксировать расстояние между ножками 1 и 2, т.е. измеряемую длину. Затем по линейке и нониусу отсчитывают длину так, как описано выше.

Пример:



Микрометр



- 1 – упор, 2 – микрометрический винт, 3 – стержень,
4 – барабан, 5 – трещетка, 6 – стопор, 7 – скоба

Рисунок 2 – Устройство микрометра

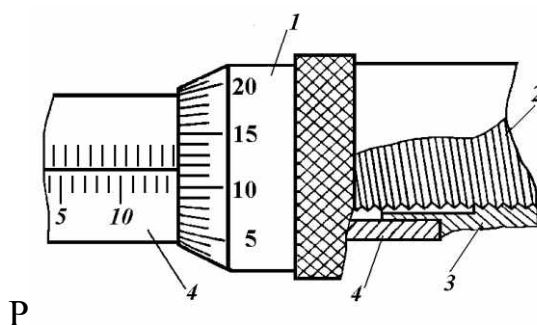


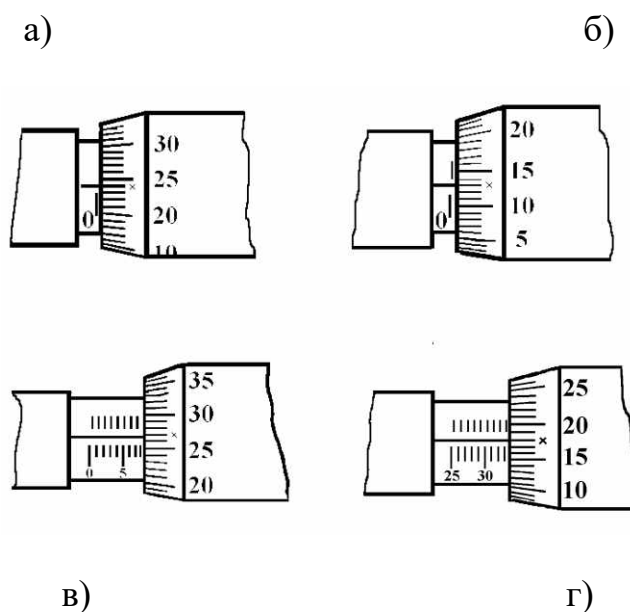
Рисунок 3 – Детальное изображение стержня и барабана микрометра

Для измерения длины с еще большей точностью - до 0,01 мм - используется микрометр (рисунок 2). Главная его часть - микрометрический винт 2 с шагом, равным 0,5 мм, который проходит через стержень 3. Другой конец винта скреплен внутри с полым цилиндром - барабаном 4, который скреплен, в свою очередь, с трещоткой 5. Вращением барабана винт перемещается, ввинчиваясь во внутреннюю резьбу стержня 3, закрепленного в скобе 7. На другой стороне скобы имеется упор 1. Винт 2 и упор 1 образуют как бы тиски, в которые и зажимается измеряемое тело.

На рисунке 3 стержень и барабан показаны более детально. На скошенном срезе барабана 1 по его окружности нанесена круговая шкала, имеющая 50 делений. При вращении барабана в резьбовой втулке 3 микровинт 2 скользит вдоль неподвижного стержня 4, на котором нанесена горизонтальная ось. Ниже этой оси миллиметровые деления, а выше нее - точно такие же деления, но сдвинутые относительно нижних на 0,5 мм вправо. Когда стержень винта и упор

соприкасаются, край барабана должен совпасть с нулевым делением нижней линейкой шкалы, а нулевое деление барабана должно в точности совпасть с осью линейной шкалы. Так как шаг микрометрического винта равен 0,5 мм, а на барабане 50 делений, то поворот на одно деление соответствует смещению винта по горизонтали на 0,01 мм. Эта цифра дает точность микрометра. Как сказано выше, при измерении какого-либо линейного размера, тело помещают между стеблем винта и упором. Затем вращают барабан, пользуясь насечкой и трещоткой 5 до тех пор, пока тело не окажется "зажатым". При этом нужно помнить, что заканчивать вращение барабана нужно обязательно трещоткой 5. При первом же звуке трещотки вращение нужно прекратить и сделать отсчет показания микрометра. Трещотка предотвращает появление неисправностей, возникающих из-за слишком сильного "сдавливания" предмета. При необходимости микровинт может быть закреплен при помощи стопора 6. Отсчет показания микрометра делается так: по нижней линейной шкале отсчитывается число n - номер деления нижней линейной шкалы, ближайшего к краю барабана. Этот номер дает целое число миллиметров.

Пример:



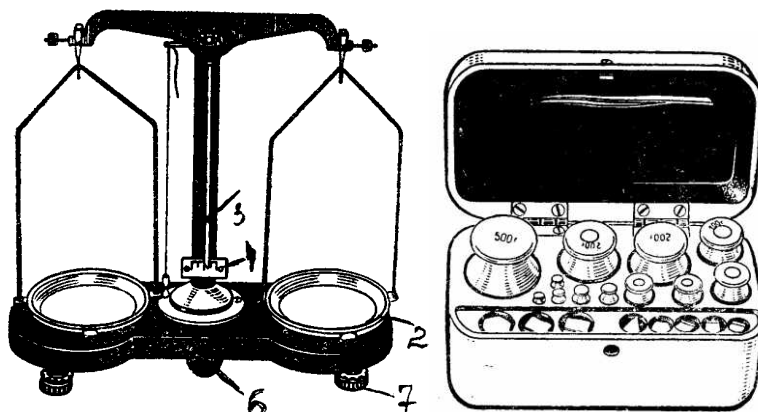
а) 0,24 мм; б) 0,63 мм; в) 8,27 мм; г) 33,68 мм.

Технические весы

Основной частью весов (рисунок 4) является коромысло 1, к концам которого подвешены чашки 2. Осью вращения коромысла является призма, опирающаяся на твердую пластинку. Положение коромысла регистрируется с помощью стрелки 3 и шкалы 4. В положении равновесия стрелка указывает на нулевое деление шкалы. Винты 5 служат для коррекции положения равновесия. Для закрепления коромысла в неподвижном состоянии служит арретир 6. Горизонтальное положение площадки весов можно скорректировать винтами 7.

При взвешивании необходимо выполнять следующие основные правила:

1. Сначала следует проверить равновесие весов, при этом стрелка должна совершать колебания около нулевой отметки шкалы.
2. Взвешиваемый предмет следует класть на левую чашку, а разновесы - на правую. Для коррекции неравноплечности весов можно провести повторное взвешивание, поменяв местами предмет и разновесы. Результат определяется как среднее геометрическое из результатов взвешивания.



1 – коромысло, 2 – чашки, 3 – стрелка,
4 – шкала, 5 – винты, 6 – арретир, 7 – винты

Рисунок 4 – Устройство технических весов

3. Класть тело и разновесы на чашки весов можно только при арретированных весах. Затем весы освобождают от арретира и проверяют состояние равновесия. Перед переключиванием разновесов весы следует вновь арретировать.
4. Разновесы следует брать пинцетом.
5. Погрешность весов определяется их классом. Приблизительно она равна минимальной величине перегрузке, вызывающей видимое нарушение равновесия.

Ход работы

а) Измерение плотности цилиндра:

1. Записать значение массы и ее абсолютную ошибку в таблицу 1.
2. Измерить диаметр и высоту цилиндра штангенциркулем 5 раз.
3. Посчитать средние значение $\bar{D}$ и $\bar{h}$, абсолютные ошибки измерений $\Delta D = |\bar{D} - D|$ и $\Delta h = |\bar{h} - h|$, занести их значения в таблицу 1.
4. Посчитать средние значения $\Delta \bar{D}$ и $\Delta \bar{h}$, занести их значения в таблицу 1.
5. Плотность считаем один раз, по средним значениям: $\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{V} = \frac{4\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}$.

Результат занести в таблицу1.

6. Вычислить относительную и абсолютную ошибки измерения средней плотности и занести в таблицу 1: $\varepsilon_{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \cdot 100\% = \frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta \bar{H}}{\bar{H}} + 2 \frac{\Delta \bar{D}}{\bar{D}} \cdot 100\%$

7. Окончательный результат записать в виде:

$$\rho_{ц.ш} = \bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho} = \dots \pm \dots \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \varepsilon_{ц.ш} = \dots \%$$

8. Аналогичные действия произвести с микрометром и записать окончательный результат в виде: $\rho_{ц.ш} = \bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho} = \dots \pm \dots \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \varepsilon_{ц.ш} = \dots \%$

Таблица 1 - Измерения техническими весами, штангенциркулем и микрометром

Измерения техническими весами, штангенциркулем									
Цилиндр									
N п/п	m кг	Δm кг	D мм	ΔD мм	h мм	Δh мм	ρ кг/м ³	$\Delta \rho$ кг/м ³	$\varepsilon_{\rho}, \%$
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
ср. зн.			$\bar{D} =$	$\Delta \bar{D}$	$\bar{h} =$	$\Delta \bar{h}$	$\bar{\rho} =$		
Измерения техническими весами, микрометром									
Цилиндр									
N п/п	m кг	Δm кг	D мм	ΔD мм	h мм	Δh мм	ρ кг/м ³	$\Delta \rho$ кг/м ³	$\varepsilon_{\rho}, \%$
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
ср. зн.			$\bar{D} =$	$\Delta \bar{D}$	$\bar{h} =$	$\Delta \bar{h}$	$\bar{\rho} =$		

б) Измерение плотности параллелепипеда:

1. Записать значение массы и ее абсолютную ошибку в таблицу 2.
2. Измерить ширину, длину и высоту цилиндра штангенциркулем 5 раз.
3. Посчитать среднее значение и абсолютные ошибки $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ измерений и занести их значения в таблицу 2.
4. Плотность считаем один раз, по средним значениям: $\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{V} = \frac{\bar{m}}{\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}}$. Результат в таблицу 2.
5. Вычислить относительную и абсолютную ошибки косвенного измерения

средней плотности: $\varepsilon_{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \cdot 100\% = \frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} + \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} + \frac{\Delta \bar{b}}{\bar{b}} + \frac{\Delta \bar{c}}{\bar{c}} \cdot 100\%$

$$\Delta \bar{\rho} = (\varepsilon_{\bar{\rho}} \cdot \bar{\rho}) / 100\%$$

Занести результат в таблицу 2.

6. Окончательный результат записать в виде:

$$\rho_{n.ш} = \bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho} = \dots \pm \dots \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \varepsilon_{n.ш} = \dots \%$$

7. Аналогичные действия произвести с микрометром и записать окончательный результат в виде: $\rho_{n.м} = \bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho} = \dots \pm \dots \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \varepsilon_{n.м} = \dots \%$

Таблица 2 - Измерения техническими весами, штангенциркулем и микрометром

Измерения техническими весами, штангенциркулем											
Параллелепипед											
N п/п	m кг	$\Delta m, \text{кг}$	a, м	$\Delta a, \text{м}$	b, м	$\Delta b, \text{м}$	c, м	$\Delta c, \text{м}$	ρ кг/м ³	$\Delta \rho, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon_{\rho}, \%$
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											
ср. зн.			$\bar{a} =$		$\bar{b} =$		$\bar{c} =$		$\bar{\rho} =$		
Измерения техническими весами, микрометром											
Параллелепипед											
N п/п	m кг	$\Delta m, \text{кг}$	a, м	$\Delta a, \text{м}$	b, м	$\Delta b, \text{м}$	c, м	$\Delta c, \text{м}$	ρ кг/м ³	$\Delta \rho, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon_{\rho}, \%$
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											
ср. зн.			$\bar{a} =$		$\bar{b} =$		$\bar{c} =$		$\bar{\rho} =$		

Контрольные вопросы

1. Строение штангенциркуля. Как производятся измерения штангенциркулем?
2. Строение микрометра. Как производятся измерения микрометром?
3. Как производится вычисление погрешностей при прямых измерениях.
4. Как производится вычисление погрешностей при косвенных измерениях.
5. Запишите формулу для определения плотности цилиндрической формы и

в виде параллелепипеда.

Лабораторная работа № 2

Изучение закона сохранения импульса.

Цель работы: исследовать соударение тел, проверить выполнение законов сохранения импульса и энергии, оценить погрешность опытов.

Оборудование: специальная установка, набор тел (шайб), весы

Краткая теория.

Описание установки

Установка состоит из горизонтально расположенного рабочего поля 3 (рисунок 1) с нанесенной координатной сеткой, по которому перемещаются взаимодействующие тела 1 и 2. Начальную скорость телу 1 в направлении оси X сообщает ударный пружинный механизм 5. Перед выстрелом тело 1 фиксируется между направляющими 6. Ударный механизм снабжен винтом 4, изменяя положение которого, можно изменять начальный импульс тела 1.

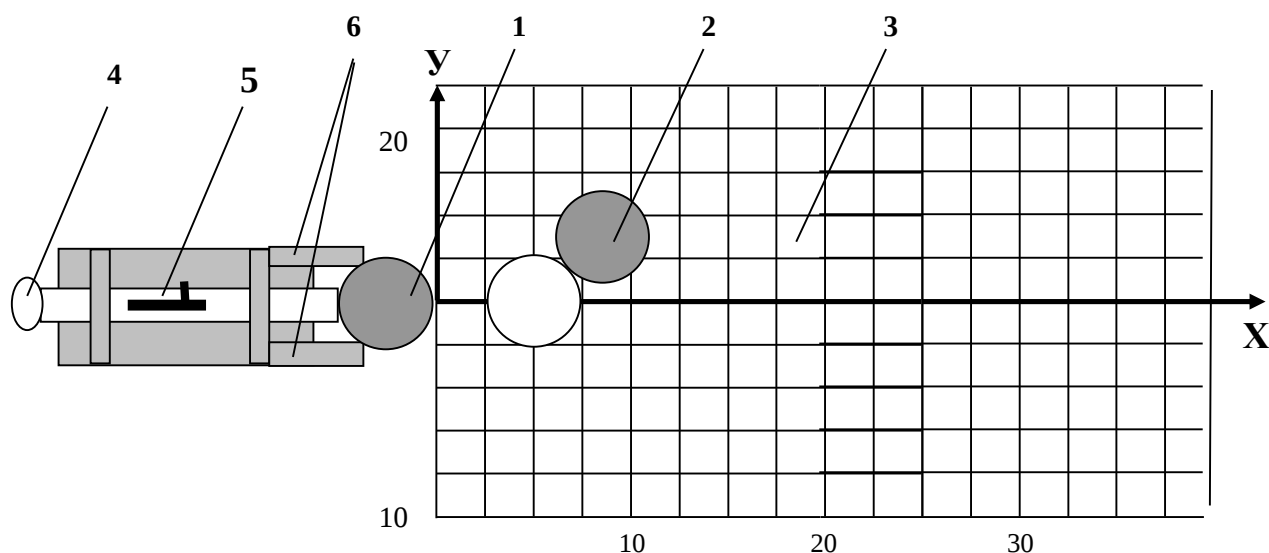


Рисунок 1 – Установка для изучения закона сохранения импульса

Описание метода измерений

Боёк ударного пружинного механизма, ударяя по телу 1 (рисунок 2), сообщает ему начальный импульс, значение которого перед взаимодействием тел

$$\vec{P}_o = m_1 \vec{v}_o \quad (1)$$

где m_1 – масса первого тела, $\vec{v}_o$ – начальная скорость тела.

Начальную скорость тела v_o можно оценить по длине пути l_o , пройденному телом по рабочему полю до остановки при свободном движении. Работа силы

трения по определению равна $A_{mp} = -\mu mgl$. По теореме о кинетической энергии эта работа равна приращению энергии тела

$$A_{mp} = \Delta E = 0 - \frac{mv_o^2}{2} \quad (2)$$

Учитывая это, найдем начальную скорость тела

$$v_o = \sqrt{2g\mu l_o} \quad (3)$$

Следует отметить, что v_o - скорость шайбы в момент соударения, когда она находится на расстоянии l_o от точки, где оно остановится.

После взаимодействия тела начинают двигаться со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ соответственно. Их суммарный импульс:

$$\vec{P} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 \quad (4)$$

где скорости тел $v_1 = \sqrt{2g\mu l_1}$ – скорость 1 после взаимодействия, $v_2 = \sqrt{2g\mu l_2}$ – скорость 2 после взаимодействия (5)

l_1, l_2 - расстояния, проходимые телами после взаимодействия.

Длину пути l_o при свободном движении тела 1 (в отсутствие второго тела), а также после соударения l_1 и l_2 , определяют по изменению координат x и y крайних точек тел (рисунок 2).

$$l_o = \Delta x = x - x_{o1}$$

$$l_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2} = \sqrt{(x_1 - x_{o1})^2 + (y_1 - y_{o1})^2} \quad (6)$$

$$l_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2} = \sqrt{(x_2 - x_{o2})^2 + (y_2 - y_{o2})^2}$$

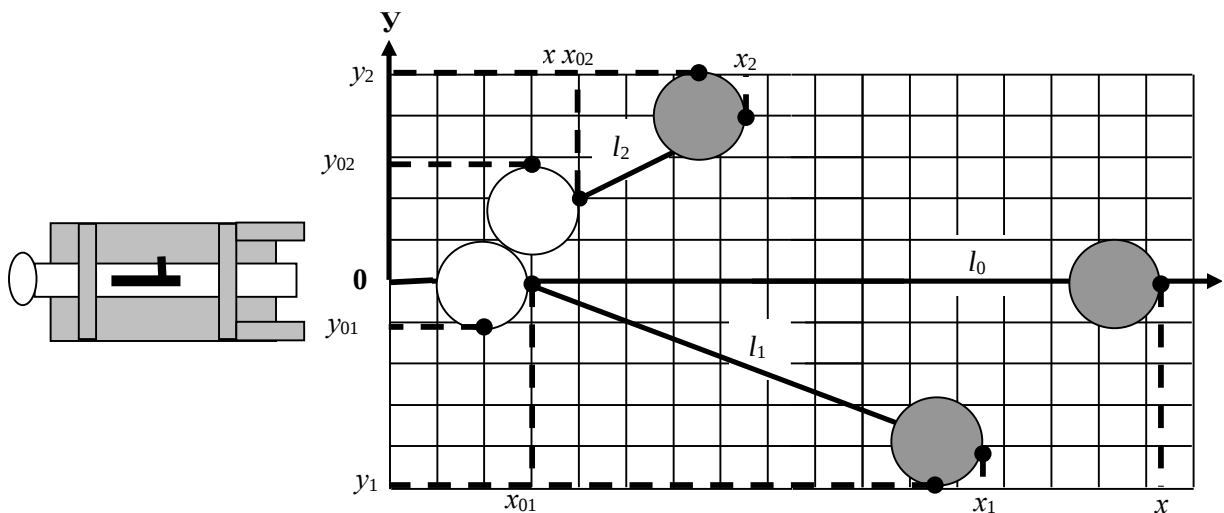


Рисунок 2 – Определение длины пути l_o при свободном движении тела

В случае нецентрального удара, первое тело продолжит движение под углом α к направлению оси X . При этом:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta y_1}{l_1}, \quad \cos \alpha = \frac{\Delta x_1}{l_1} \quad (7)$$

Второе тело начнет двигаться под углом β к оси X

$$\sin \beta = \frac{\Delta y_2}{l_2}, \quad \cos \beta = \frac{\Delta x_2}{l_2} \quad (8)$$

Закон сохранения импульса в проекции на оси координат X и Y принимает вид:

$$\text{на ось X: } m_1 v_0 = m_1 v_1 \cos \alpha + m_2 v_2 \cos \beta$$

$$\text{на ось Y: } 0 = m_1 v_1 \sin \alpha + m_2 v_2 \sin \beta$$

С учетом (6)–(8) закон сохранения импульса принимает вид:

$$\text{на ось X(проекция)} \quad m_1 \sqrt{l_0} = \frac{m_1 \Delta x_1}{\sqrt{l_1}} + \frac{m_2 \Delta x_2}{\sqrt{l_2}} \quad (9)$$

$$\text{на ось Y(проекция)} \quad 0 = \frac{m_1 \Delta y_1}{\sqrt{l_1}} - \frac{m_2 \Delta y_2}{\sqrt{l_2}}$$

До взаимодействия кинетическая энергия системы:

$$E_{\text{нач}} = \frac{m_1 v_0^2}{2} = \mu m_1 g l_0 \quad (10)$$

а после взаимодействия энергия системы:

$$E_{\text{конеч}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \mu m_1 g l_1 + \mu m_1 g l_2 \quad (11)$$

При абсолютно упругом ударе энергия системы не меняется:

$$E_{\text{нач}} = E_{\text{конеч}},$$

$$\text{и коэффициент восстановления энергии} \quad k = \frac{E_{\text{конеч}}}{E_{\text{нач}}} = 1$$

$$\text{При не абсолютно упругом ударе} \quad E_{\text{нач}} > E_{\text{конеч}},$$

$$\text{и коэффициент восстановления энергии} \quad k < 1.$$

Ход работы

Задание 1. Сравнение импульсов и энергий до и после взаимодействия

1. Выберите два тела примерно одинаковой массы, определите её и запишите m_1 и m_2 в таблицу 1.
2. Определите начальные положения шайб x_{01}, y_{01} и x_{02}, y_{02} и запишите в таблицу 1.
3. Определите скорость тела 1 при свободном движении. Для этого взведите пружинный механизм, зафиксировав его в первом пазу. Шайбу 1 вставьте

- в направляющие до упора. Зная начальные координаты шайб, произведите выстрел (рис.2) и занесите в таблицу 1 координату x крайней точки шайбы.
- При тех же условиях повторить опыт еще 6 раз. Результаты занесите в табл. 1 и рассчитайте среднее значение $\bar{x}$.
 - Установите тело 1 в исходное положение. Тело 2 установите в одном *из закрашенных кругов*. Запишите начальные координаты крайних точек второго тела (рисунок 2). Произведите выстрел и занесите в таблицу 1 координаты крайних точек тел.
 - При тех же условиях повторите опыт еще 6 раз. Результаты занесите в таблицу 1.
 - Рассчитайте средние значения $\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_2$ и занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Начальные массы тел, кг		Начальные координаты тел, мм			
$m_1=$		$x_{01} =$		$y_{01} =$	
$m_2=$		$x_{02} =$		$y_{02} =$	
Конечные координаты тел					
№	при свобод- ном движении	после взаимодействия			
	X, мм	x_1 ,мм	x_2 ,мм	y_1 ,мм	y_2 ,мм
1					
2					
...					
6					
сред- нее	$\bar{x} =$	$\bar{x}_1 =$	$\bar{x}_2 =$	$\bar{y}_1 =$	$\bar{y}_2 =$

- Рассчитайте средние значения приращения координат $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$ согласно формулам:

$$\Delta x = \bar{x} - x_{o1} \quad \Delta x_1 = \bar{x}_1 - x_{o1} \quad \Delta x_2 = \bar{x}_2 - x_{o2}$$

$$\Delta y_1 = \bar{y}_1 - y_{o1} \quad \Delta y_2 = \bar{y}_2 - y_{o2}$$
- Рассчитайте средние значения перемещения тел $\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$ по формулам:

$$l_0 = \Delta x \quad l_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2} \quad l_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$
- Рассчитайте по формуле (9) величины, пропорциональные проекциям импульсов тел на оси координат до и после соударения, и занесите результаты в таблицу 2.
- Рассчитайте величины, пропорциональные энергиям до и после соударения (формулы (10) и (11)) и занесите результаты в таблицу 3.
- Сделайте выводы.

Таблица 2

Импульс	До удара	После удара
Вдоль оси X	$m_1 \sqrt{l_o}$, кг мм ^{1/2}	$m_1 \frac{\Delta x_1}{\sqrt{l_1}} + m_2 \frac{\Delta x_2}{\sqrt{l_2}}$, кг мм ^{1/2}
Вдоль оси Y	0	$m_1 \frac{\Delta y_1}{\sqrt{l_1}} - m_2 \frac{\Delta y_2}{\sqrt{l_2}}$, кг мм ^{1/2}

Таблица 3

Энергия	До удара	После удара
	$m_1 l_o$, кг мм	$m_1 l_1 + m_2 l_2$, кг мм
Коэффициент восстановления	$\frac{[m_1 l_1 + m_2 l_2]}{m_1 l_o} =$	

Задание 2. Простейшая оценка погрешности измерений

В качестве систематической погрешности в данных опытах следует взять приборную погрешность, равную цене деления измерительного прибора. Случайная погрешность определяется по разбросу выборки:

$$\Delta_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2},$$

где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – максимальное и минимальное значение измеряемой величины в серии из N повторных измерений.

1. В таблицу 4 занесите средние значения прямых измерений, выполненных в одном из упражнений и значения погрешностей этих величин – систематической и случайной.
2. Абсолютную погрешность рассчитайте по формуле $\Delta a = t_\alpha(n) \cdot S_{\langle a \rangle}$. Где средняя квадратичная погрешность результата серии измерений:

$$S_{\langle a \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}, \text{ где } \Delta a_i = |a - a_i|$$

Доверительная вероятность или коэффициент надежности α : $\alpha = P = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1}$

3. Коэффициент Стьюдента $t_\alpha(n)$ определяется для заданной надежности α и числа произведенных измерений n (**согласно** таблице 1, стр. 13). При числе измерений $2 \leq n \leq 10$ доверительный интервал определяется с помощью распределения Стьюдента. В нашем случае 3,1.

Таблица 4

Величина	Значение	Абсолютная погрешность		Наибольшая из них	
		систематическая Δ_s	случайная Δ	абсолютная Δ_a	относит ε
x_1 (мм)					
y_1 (мм)					
x_2 (мм)					
y_2 (мм)					

4. Находятся границы доверительного интервала (погрешность результата измерений) $\Delta a = 3,1 \cdot S_{<a>}$
5. Окончательный результат записывается в виде $a = \bar{a} \pm \Delta a$.
6. Оценивается относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

Контрольные вопросы

- Как формулируется и записывается закон сохранения импульса:
 - для замкнутой механической системы;
 - при упругом центральном ударе двух тел;
 - при неупругом центральном ударе?
- Как формулируется и записывают закон сохранения механической энергии при упругом центральном ударе двух тел?
- Почему соударяющиеся шайбы можно считать замкнутой системой?
- Какой удар называется центральным? Какой удар называется нецентральным? От чего зависит направление движения тел после нецентрального удара?
- Расскажите, как определяются абсолютная и относительная погрешности измерений физических величин (таблица 4).

Лабораторная работа № 3

Изучение закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека

Цель работы: получить экспериментальную зависимость углового ускорения от момента силы и определить момент инерции маятника динамическим методом.

Оборудование: маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, линейка, набор грузов.

Краткая теория.

Описание установки

Основной частью установки является крестообразный маятник, который может вращаться с малым трением вокруг оси O (рисунок 1).

По стержням крестовины могут перемещаться подвижные цилиндры 3 массой m_0 . На одной оси с крестовиной насажены шкивы 1 и 2 разного радиуса r . К концу нити, намотанной на один из шкивов и перекинутой через невесомый блок 4, прикрепляется груз 5 массой m , приводящий маятник во вращательное движение.

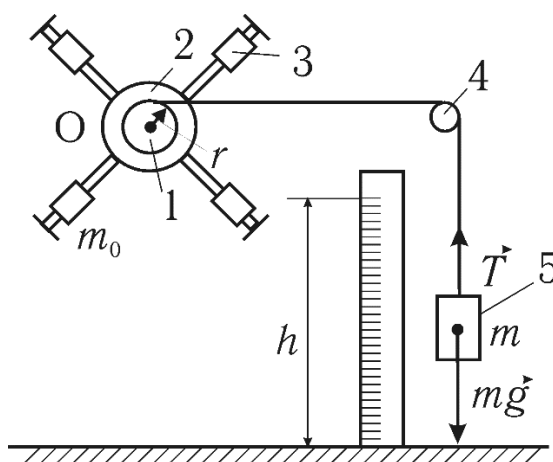


Рисунок 1 – Установка для изучения закона динамики вращательного движения

Время прохождения грузом расстояния h измеряют секундомером. Маятник в исходном положении удерживается электромагнитом, при нажатии клавиши "Пуск" секундомера электромагнит отключается, груз начинает двигаться и одновременно включается секундомер (рисунок 2). Счёт времени за-

канчивается при достижении грузом нижнего положения. Для того, чтобы секундомер сработал, необходимо установке с помощью винтов в основании платформы придать такое положение, при котором груз опускался бы точно в отмеченный круг. В этот круг вмонтирован датчик, выключающий секундомер. Расстояние h отмечается по линейке, установленной в верхней части установки, на которой указывается расстояние груза в начальном положении от основания установки.



Рисунок 2 – Установка маятник Обербека в работе

Описание метода измерений

Приняв, что нить невесома, нерастяжима, считаем движение грузов равноускоренным (рисунок 3).

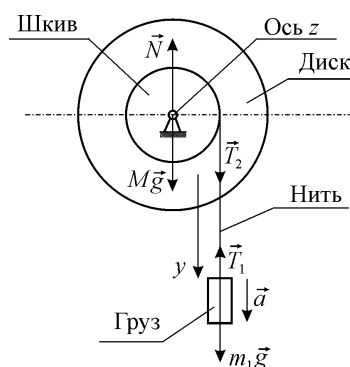


Рисунок 3 – Равноускоренное движение груза

Ускорение груза a определяют, измерив время его движения и пройденный путь h :

$$a = 2h/t^2 \quad (1)$$

Угловое ускорение маятника α выразим через линейное ускорение и радиус шкива r :

$$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{2h}{rt^2} \quad (2)$$

Силу натяжения нити $T=T_1=T_2$ можно определить, применив к движению груза массой $m=m_1$ закон Ньютона (пренебрегая при этом сопротивлением воздуха):

$$T = m(g - a),$$

но обычно $a \ll g$, $T = m(g - a) = mg$,

Таким образом, измерив для груза массой m время t прохождения им расстояния h , можно рассчитать угловое ускорение α (формула 2) маятника и определить момент силы, действующий на маятник:

$$M = Tr = mgr \quad (3)$$

При вращении маятника на него действует также тормозящий момент сил трения $M_{\text{тр}}$, и поэтому, используя основное уравнение динамики вращательного движения тела $I\alpha = \sum M_i$ принимает вид:

$$I\alpha = M - M_{\text{тр}} \quad (4)$$

Это уравнение позволяет найти момент инерции блока I динамическим методом, измерив ряд величин α и M . Для более точного определения величины I в опыте получают зависимость $\alpha = f(M)$, линейный характер которой (при $M_{\text{тр}} = \text{const}$) позволяет рассчитать среднее значение I по угловому коэффициенту опытной прямой.

Задание 1 Изучение закона вращения маятника

1. Определите массу грузов m , установите центры подвижных цилиндров m_0 на одинаковом расстоянии l от оси вращения и измерьте радиусы шкивов r_1 и r_2 . Результаты запишите в таблицу 1.
2. Вращая маятник рукой, намотайте нить на шкив большего диаметра r_1 , следя, чтобы груз m достиг выбранного положения h . С тем же шкивом, увеличивая массу груза m (не менее 4-х раз), запишите время t движения груза на пути h . Для этого нажмите кнопку «Пуск». При этом отключится тормозное устройство, удерживающее маятник. Одновременно включите секундомер. Внесите результаты первого эксперимента в таблицу измерений.
3. Все результаты по мере их получения записывайте в таблицу 1.
4. Аналогичные измерения проведите, используя малый шкив радиусом r_2 .
5. Вычислите значения α и M в каждом опыте по формулам (2, 3).

Таблица 1

$h =$ (м)					
r , мм	№	m , г	t , с	M , нм	α , с ⁻²
$r_1 =$	1				
	2				
	3				

	4				
Координаты средней точки					
$r_2 =$	1				
	2				
	3				
	4				
Координаты средней точки					

- Используйте рекомендации (см. стр. 5-6, указания *Требования к построениям графиков* формулы 4,5), изобразите графически зависимость углового ускорения α от момента силы M , *нанеся точки для обоих шкивов на один график*.
- По графику определите среднее значение момента инерции маятника $I = \Delta M / \Delta \alpha$, рассчитав угловой коэффициент прямой.
- По графику определите момент сил трения, сравните его с моментами, создаваемыми грузами, и сделайте вывод.
- Рассчитайте относительную δ_I и абсолютную Δ_I погрешности момента инерции (см. стр. 5-6, указания *Требования к построениям графиков* формулы 4,5).

Задание 2 Измерение динамическим методом момента инерции крестовины маятника

- Закрепите подвижные цилиндры m_0 на максимальном и одинаковом расстоянии l от оси вращения. Прикрепите к нити груз массой m . Выберите для эксперимента один шкив, измерьте его радиус r и запишите в таблицу 2 значения m , r и h .
- Вращая маятник, намотайте нить на шкив в один слой и измерьте время движения t .
- Проведите ещё 6 опытов с тем же грузом m , уменьшая всякий раз на 1,5–2 см расстояние цилиндров l от оси вращения. Результаты измерений l и t вносите в таблицу 2.

Таблица 2

$h =$ м		$m =$ кг	$r =$ мм	
№	l , см	l^2 , см ²	t , с	I , кг м ²
1				
2				
...				
7				
сред.	$l_{\text{ср}}$	$l_{\text{ср}}^2 =$	$t_{\text{ср}} =$	$J_{\text{ср}} =$

- Вычислите для каждого опыта величины l^2 и момент инерции маятника по формуле, полученной с учётом выражений (2-4):

$$I = \frac{M}{\alpha} = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (5)$$

5. Постройте график зависимости момента инерции маятника I от l^2 (см. рекомендации к построениям графиков стр.5-6). Сделайте вывод о характере полученной зависимости $I = f(l^2)$ с учётом того, что момент инерции маятника, у которого цилиндры приняты за материальные точки,

$$I = I_{\text{кр}} + 4m_0 l^2. \quad (6)$$

6. Определите с помощью графика (динамическим методом) момент инерции крестовины $I_{\text{кр}}$, которой согласно (6) равен параметру b линейной зависимости $I = f(l^2)$.
7. Рассчитайте массу подвижных цилиндров m_0 .
8. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Запишите закон динамики вращательного движения.
2. От чего зависят: а) угловое ускорение маятника, б) момент инерции маятника, в) момент силы, действующий на маятник (см выполнение работы)?
3. Какая зависимость лежит в основе динамического метода измерения момента инерции I ?
4. Какие величины определяют наклон прямой на графике $\alpha = f(M)$?
5. Получить расчетную формулу (5, задание 2) для определения момента инерции?

Лабораторная работа № 4

Проверка закона сохранения момента импульса

Цель работы: проверить закон сохранения момента импульса и энергии при неупругом взаимодействии маятников, оценить погрешность измерений.

Оборудование: специальная установка, секундомер, линейка.

Краткая теория.

Описание установки

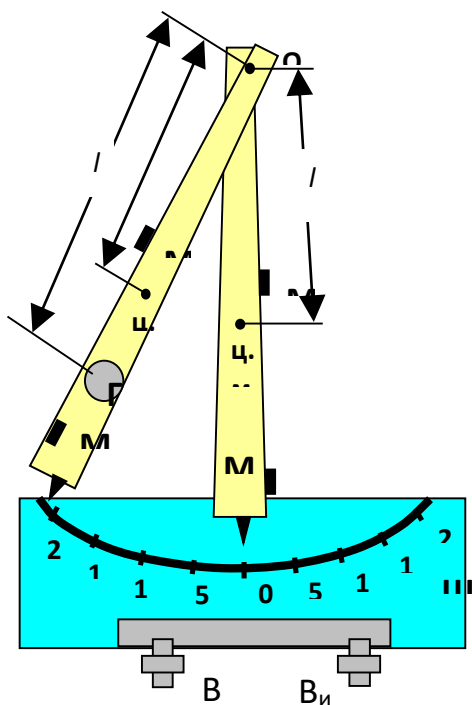


Рисунок 1 – Установка для проверки закона сохранения момента импульса

Установка состоит из двух физических маятников (1) (масса m_1) и (2) (масса m_2), которые независимо могут вращаться вокруг общей оси O . Маятники снабжены магнитами M , с помощью которых они стягиваются и могут вращаться вокруг O , как единое целое. Для изменения момента инерции к маятнику 1 может быть прикреплен добавочный груз Γ (масса m_Γ). На каждом маятнике красной меткой указано положение центра масс (ц.м.), расстояние которого от оси вращения равно, соответственно, l_1 и l_2 . (рисунок 1).

Очевидно, центр масс маятника с добавочным грузом находится от оси вращения на расстоянии:

$$l_{1\Gamma} = \frac{m_1 l_1 + m_\Gamma l_\Gamma}{m_1 + m_\Gamma} \quad (1)$$

где l_Γ – расстояние центра груза от оси вращения.

Центр масс двух маятников с добавочным грузом находится от оси вращения на расстоянии:

$$l_{12\Gamma} = \frac{m_1 l_1 + m_2 l_2 + m_\Gamma l_\Gamma}{m_1 + m_2 + m_\Gamma} \quad (2)$$

Если добавочный груз отсутствует, то это расстояние

$$l_{12} = \frac{m_1 l_1 + m_2 l_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

Угол отклонения маятника от положения равновесия определяется по шкале Ш. В положении равновесия маятники располагаются так, чтобы их визиры находились против нулевой отметки шкалы Ш. Это достигается с помощью винтов В в основании установки. Если отклонить один из маятников, и закрепить в отклоненном положении, а второй отклонить и отпустить, то он будет совершать колебательное движение около положения равновесия.

Если же один из маятников отклонить из положения равновесия на угол α (второй при этом оставить в положении равновесия) и отпустить, то после столкновения маятников они начнут двигаться как одно целое и отклонятся от положения равновесия на угол β .

Описание метода измерений

Два физических маятника, имеющие общую горизонтальную ось вращения образуют замкнутую систему в момент прохождения ими положения равновесия (в этом положении моменты сил тяжести равны нулю, а других моментов относительно оси вращения просто нет). Следовательно, при прохождении положения равновесия для этой системы выполняется закон сохранения момента импульса:

$$I_1 \vec{\omega}_1 + I_2 \vec{\omega}_2 = I_1 \vec{\omega}'_1 + I_2 \vec{\omega}'_2,$$

где I_1 и I_2 – моменты инерции маятников относительно оси вращения;

$\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$ – их угловые скорости в положении равновесия до их соударения;

$\vec{\omega}'_1$ и $\vec{\omega}'_2$ – их угловые скорости после взаимодействия.

До взаимодействия второй маятник покоится ($\vec{\omega}_2 = 0$), а после взаимодействия оба маятника движутся как единое целое ($\vec{\omega}'_1 = \vec{\omega}'_2 = \omega$) и поэтому закон сохранения момента импульса в проекции на ось вращения принимает вид:

$$I_1 \omega_1 = (I_1 + I_2) \omega \quad (4)$$

Моменты инерции маятников можно найти, зная их периоды колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}},$$

где l – расстояние от оси вращения до центра масс маятника.

Таким образом, момент инерции маятника 1:

$$I_1 = \frac{m_1 g l_1 T_1^2}{4\pi^2} \text{ (без добавочного груза),}$$

$$I_{1\Gamma} = \frac{(m_1 + m_\Gamma) g l_{1\Gamma} T_{1\Gamma}^2}{4\pi^2} \text{ (с грузом),}$$
(5)

момент инерции системы из двух маятников:

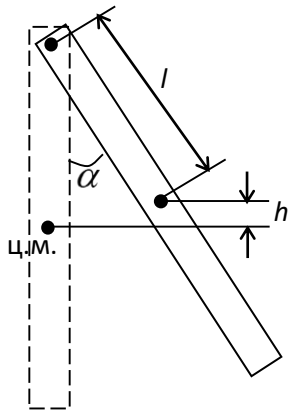
$$I_{12} = \frac{(m_1 + m_2) g l_{12} T_{12}^2}{4\pi^2} \text{ (без груза),}$$

$$I_{12\Gamma} = \frac{(m_1 + m_2 + m_\Gamma) g l_{12\Gamma} T_{12\Gamma}^2}{4\pi^2} \text{ (с грузом),}$$
(6)

где $l_{12}, l_{12\Gamma}$ – расстояние от оси до центра масс системы из двух маятников без дополнительного груза и с грузом;

$T_{12}, T_{12\Gamma}$ – период колебания системы из двух маятников (без груза и с грузом).

При отклонении маятника от положения равновесия на угол α центр масс его поднимется на высоту (рисунок 2) $h = l(1 - \cos\alpha)$.



Так как до взаимодействия и после взаимодействия на маятник действует только сила тяжести (консервативная), а момент силы сопротивления достаточно мал, из закона сохранения механической энергии:

$$mgh = \frac{I\omega^2}{2}$$

можно найти угловую скорость маятника в момент прохождения положения равновесия:

$$\omega = \sqrt{\frac{2mgl(1 - \cos\alpha)}{I}},$$

Рисунок 2 – Отклонение маятника

где $\frac{I\omega^2}{2}$ – энергия колеблющегося маятника при прохождении положения равновесия,

mgh – энергия маятник, отклоненного на угол α (при этом его центр масс поднят на высоту h).

В наших опытах первоначально маятник 1 отклоняется от положения равновесия на угол α и, следовательно, его угловая скорость при прохождении положения равновесия (т.е. перед взаимодействием (столкновением) с маятником В)) :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2m \cdot g l_1 (1 - \cos\alpha)}{I_1}} \text{ (без добавочного груза);}$$

$$\omega_{1\Gamma} = \sqrt{\frac{2(m_1 + m_\Gamma) g l_{1\Gamma} (1 - \cos\alpha)}{I_{1\Gamma}}} \text{ (с грузом)}$$
(7)

После столкновения система из двух маятников отклоняется на угол β , и следовательно, их начальная угловая скорость в положении равновесия :

$$\omega_{12} = \sqrt{\frac{2(m_1 + m_2)gl_{12}(1 - \cos\beta)}{I_{12}}} \quad (\text{без добавочного груза})\%;$$

$$\omega_{12\Gamma} = \sqrt{\frac{2(m_1 + m_2 + m_\Gamma)gl_{12\Gamma}(1 - \cos\beta)}{I_{12\Gamma}}} \quad (\text{с грузом}). \quad (8)$$

Задание 1 Определение моментов импульсов и кинетической энергии маятников

1. С помощью винтов В (рис.1) установите маятники в свободном положении на нулевую отметку шкалы.
2. Измерьте расстояние l_1 , l_2 и l_Γ (см. рис.1) и запишите их значение в таблицу 1.

Запишите также значения m_1 , m_2 и m_Γ .

Таблица 1

расстояние l (см)	масса m (г)
$l_1 =$	$m_1 =$
$l_2 =$	$m_2 =$
$l_\Gamma =$	$m_\Gamma =$

3. Рассчитайте расстояние от оси вращения до центра масс маятников $l_{1\Gamma}$, l_{12} и $l_{12\Gamma}$ по формулам (1), (2), (3).
4. Отведите в сторону маятник 2, закрепите его. Определите время ($n = 10$) колебаний t_1 маятника 1 и время 10 колебаний маятника 1 с добавочным грузом $t_{1\Gamma}$.
5. Определите время ($n=10$) колебаний системы, состоящей из двух маятников, без дополнительного груза t_{12} и с грузом $t_{12\Gamma}$. Рассчитайте периоды колебаний T_1 , $T_{1\Gamma}$, T_{12} , $T_{12\Gamma}$. Полученные значения занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№	время колебаний t (с)	период колебаний T (с)
10	$t_1 =$	$T_1 =$
	$t_{1\Gamma} =$	$T_{1\Gamma} =$
	$t_{1,2} =$	$T_{1,2} =$
	$t_{1,2,\Gamma} =$	$T_{1,2,\Gamma} =$

6. Рассчитайте моменты инерции маятников I_1 , $I_{1\Gamma}$, I_{12} , $I_{12\Gamma}$ по формулам (5), (6).
7. Отклоните маятник 1 (без груза) на угол α_1 (по указанию преподавателя) и запишите его значение в таблицу 3. Маятник 2 при этом находится в положении равновесия. Опустите маятник 1 и отметьте угол β_1 , на который отклонится система из двух маятников после взаимодействия. Опыт повторите не менее 5 раз и рассчитайте среднее значение угла

$$\bar{\beta}_1.$$

Таблица 3

№	α_1	β_1	α_2	β_2
1				
2				
3				
4				
5				
сред.		$\bar{\beta}_1 =$		$\bar{\beta}_2 =$

- Повторите опыт (п. п. 6-7), прикрепив к маятнику 1 добавочный груз Γ , отклоните маятник 1 на угол α_2 . Отметьте угол β_2 , на который отклонится система из двух маятников с грузом после взаимодействия. Опыт повторите не менее 5 раз и рассчитайте среднее значение угла $\bar{\beta}_2$.
- Рассчитайте угловые скорости маятников до взаимодействия ω_1 и после ω_{12} , $\omega_{1\Gamma}$ и $\omega_{12\Gamma}$ по формулам (7), (8).
- Рассчитайте моменты импульсов и энергию маятников в первом и во втором опытах. Результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Момент импульса	Без груза	С грузом
	$I_1\omega_1 =$	$I_{1\Gamma}\omega_{1\Gamma} =$
	$I_{12}\omega_{12} =$	$I_{12\Gamma}\omega_{12\Gamma} =$
Энергия маятников	$0,5I_1\omega_1^2 =$	$0,5I_{1\Gamma}\omega_{1\Gamma}^2 =$
	$0,5I_{12}\omega_{12}^2 =$	$0,5I_{12\Gamma}\omega_{12\Gamma}^2 =$

Задание 2 Оценка погрешности измерений

В качестве систематической погрешности в данных опытах следует взять приборную погрешность, равную цене деления измерительного прибора. Случайная погрешность определяется по разбросу выборки:

$$\Delta_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2},$$

где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – максимальное и минимальное значение измеряемой величины в серии из N повторных измерений.

- В таблицу 5 занесите средние значения прямых измерений, выполненных в одном из упражнений и значения погрешностей этих величин – систематической и случайной.
- Абсолютную погрешность рассчитайте по формуле $\Delta a = t_\alpha(n) \cdot S_{\langle a \rangle}$. Где средняя квадратичная погрешность результата серии измерений:

$$S_{\langle a \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Доверительная вероятность или коэффициент надежности α : $\alpha = P = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1}$

3. Коэффициент Стьюдента $t_\alpha(n)$ определяется для заданной надежности α и числа произведенных измерений n . При числе измерений $2 \leq n \leq 10$ доверительный интервал определяется с помощью распределения Стьюдента.
4. Находятся границы доверительного интервала (погрешность результата измерений) $\Delta a = t_\alpha(n) \cdot S_{\langle a \rangle}$.
5. Окончательный результат записывается в виде $a = \bar{a} \pm \Delta a$.
6. Оценивается относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

Таблица 5

Величина	Значение	Абсолютная погрешность		Наибольшая из них	
		систематическая Δ_s	случайная Δ	абсолютная Δ_a	относит. ε
m_1 (кг)			—		
m_2 (кг)			—		
m_{Γ} (кг)					
l_1 (м)			—		
l_2 (м)			—		
l_{Γ} (м)			—		
t_1 (с)			—		
t_{12} (с)			—		
$t_{1\Gamma}$ (с)			—		
α_1			—		
α_2			—		
β_1			—		

β_2			—		
-----------	--	--	---	--	--

Контрольные вопросы

1. Что такое математический маятник? физический маятник?
2. Дайте определение момента импульса материальной точки, тела? Как направлен момент импульса? Запишите закон сохранения момента импульса системы из двух маятников.
3. От каких величин зависит момент инерции маятника? Как его изменяют в данной установке?
4. От чего зависит угловая скорость маятника перед взаимодействием?
5. Чему равна энергия маятника: перед взаимодействием? после взаимодействия?

Лабораторная работа № 5 Определение ускорения свободного падения с помощью оборотного и математического маятников

Цель работы: ознакомиться с закономерностями колебаний математического и физического маятника и с одним из способов определения ускорения свободного падения.

Оборудование: оборотный (физический) и математический маятник, секундомер.

Краткая теория

Описание установки

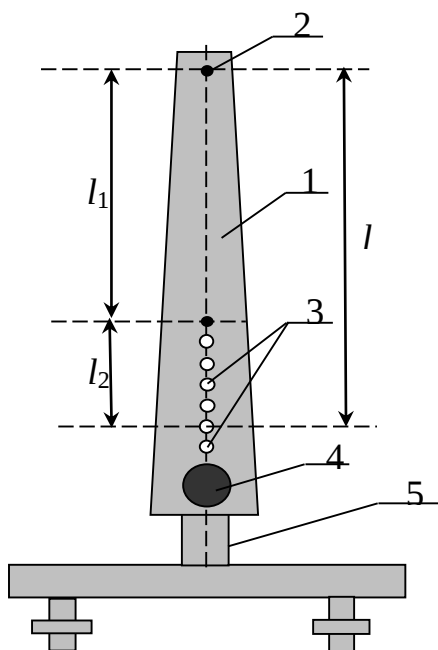


Рисунок 1 – Физический маятник

Математический маятник – материальная точка, подвешенная на нерастяжимой нити.

Физический маятник – любое тело, имеющее ось вращения, не проходящую через центр его масс.

В нашем случае (рисунок 1) - это стальная полоса 1 переменного сечения, на протяжении которого имеется несколько отверстий, с помощью которых маятник крепят на ось вращения. На одном конце имеется отверстие 2, а на другом ряд отверстий 3, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Это позволяет получать физический маятник с различными периодами колебаний. Изменить положение центра масс маятника можно с помощью дополнительного груза 4.

l – длина маятника, l_1 и l_2 – расстояния от первой и второй осей до центра масс маятника.

Описание метода измерений

Для математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, \text{ где } l - \text{длина маятника} \quad (1)$$

Оборотный маятник является физическим, и период его колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{I/mg I_c} = 2\pi\sqrt{(I_c + ml_c^2)/mg I_c} \quad (2)$$

где I – момент инерции маятника относительно точки подвеса,

I_c – момент инерции относительно центра масс,

m – масса маятника,

l_c – расстояние от центра масс маятника до точки подвеса.

Для физического маятника не удаётся измерить с той же точностью, как период T , необходимые для расчёта g величины I , l_c . Поэтому разработан метод, позволяющий с помощью обратного маятника исключить эти величины из расчётной формулы (и в том его достоинство). Допустим, что удалось найти такое положение осей вращения, что периоды колебаний маятника относительно этих осей совпадают: $T_1 = T_2 = T_0$. Тогда с учётом формулы (2) получим:

$$T_0^2 = 4\pi^2 (I_c + ml_1^2) / mgl_1; \quad T_0^2 = 4\pi^2 (I_c + ml_2^2) / mgl_2. \quad (3)$$

Здесь l_1 и l_2 – расстояния от первой и второй осей до центра масс маятника, а их сумма $l_1 + l_2 = l_0$ есть расстояние между осями, которое можно измерить достаточно точно.

Исключая из уравнений (3) величину I_c , получаем расчётную формулу для ускорения g :

$$g = \frac{4\pi^2 l_0}{T_0^2}. \quad (4)$$

Этот метод позволяет с высокой точностью определить величину g , если найти такое расположение осей на стержне, при котором периоды колебаний маятника совпадают (T не изменяется при смене оси, поэтому маятник и называется обратным).

Ход работы

Задание 1. Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника

1. Приведите маятник в движение, отклонив его на $5...10^\circ$ от положения равновесия. Измерьте время пяти полных колебаний. Запишите длину маятника.

Таблица 1

$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	N	$T, \text{ с}$
		5	

2. По формуле (1) рассчитайте ускорение свободного падения.
3. Оцените погрешность определения g , сравнив найденное значение с табличным для Астрахани ($g=9,8075 \text{ м/с}^2$).

Задание 2. Определение ускорения свободного падения с помощью обратного маятника

1. Повесьте маятник на отверстие (2), расположенное вблизи конца стержня.
2. Отклоните маятник на $5...10^\circ$ от положения равновесия и отпустите. Измерив время t для N (десяти) колебаний, определите период T_1 колебаний. Результаты запишите в таблица 2.

Примечание. Если секундомер включается и выключается вручную, то измеряйте время десяти колебаний.

Таблица 2

$N = 10$	$t_1, \text{ с}$	$T_1, \text{ с}$	№	$l, \text{ м}$	$t_2, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	$N = 10$
			1				
			2				
			3				$l_0 = \quad \text{см}$ $T_0 = \quad \text{с}$
			4				
			5				
			6				
			7				
			8				
			9				

			10				
			11				
			12				

- Снимите маятник и измерьте расстояние l между центрами отверстия (2) и крайним из отверстий (3).
- Повесьте маятник на крайнее из отверстий 3.** Измерьте время t_c для 10 колебаний и определите период колебаний T_2 .
- Повторите измерение l и периода T_2 ещё несколько раз, **перемещая ось каждый раз на 1 отверстие**. Период колебаний T_1 при этом не изменяется. Чтобы убедиться в этом, проведите его измерение в конце опыта.
- Постройте график (рисунок 2) зависимости периодов колебаний T_1 и T_2 от расстояния между осями. **Определите координаты T_0 и l_0 точки пересечения графиков.**
- l_0 - расстояние между призмами, при котором периоды колебаний оборотного маятника вокруг осей, проходящих через первую и вторую призму, одинаковы, т. е. $T_1 = T_2 = T_0$.
- Рассчитайте среднее значение g по формуле (4).

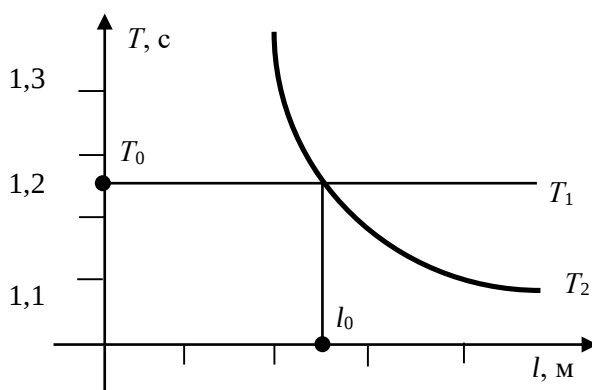


Рисунок 2 – График зависимости периодов колебаний T_1 и T_2 от расстояния между осями

- Оцените точность определения этого значения g , полагая, что для него относительная случайная погрешность согласно расчётной формуле (4) $\delta_g \cong \delta_{T_0}$. Точность же определения координаты точки пересечения двух линий определяется, как минимум, их толщиной h , а это означает, что δ_{T_0} равна отношению h к длине оси T .
- Запишите результат в виде интервала, в котором $\Delta_g = g\delta_g$:

$$g = \bar{g} \pm \Delta_g.$$
- Оцените отклонение найденной величины g от табличного значения для Астрахани ($g=9,8075 \text{ м/с}^2$); если оно заметно выше, чем найденная случайная погрешность Δ_g , укажите причины систематической погрешности.

12. В выводе сделайте анализ возможностей измерения различных физических величин с помощью механических колебаний.

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение колебаний физического и математического маятников: $x = f(t)$.
2. От каких величин (см. выполнение работы), зависят циклическая частота ω и период колебаний T физического и математического маятников?
3. Как изменяются момент инерции и период колебаний оборотного маятника при изменении оси вращения оборотного маятника?
4. По каким формулам определяют величину g с помощью математического и оборотного маятников?
5. Как в работе находят значение периода T_0 , не изменяющееся при обращении маятника?

Лабораторная работа № 6 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: определение скорости пуль с различными массами с помощью баллистического маятника.

Оборудование: Модульный учебный комплекс МУК-М1

Краткая теория

Описание установки

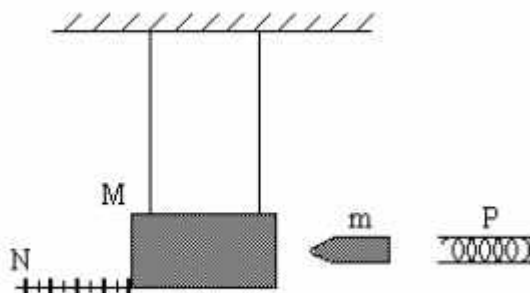


Рисунок 1 – Модульный учебный комплекс МУК-М1

Баллистический маятник представляет собой массивный цилиндр массой M , который подвешен на невесомых и нерастяжимых нитях так, что он может двигаться только поступательно. В цилиндр в горизонтальном направлении производят выстрел пулей массы m из пружинного пистолета, неподвижно закрепленного вблизи маятника (рисунок 1). Если торцевая стенка цилиндра изготовлена из мягкого и легко деформируемого материала, например, пластилина, то пуля при попадании в маятник может испытывать абсолютно неупругий удар.

Абсолютно неупругий удар – это удар, при котором потенциальная энергия упругой деформации не возникает; кинетическая энергия тел частично либо полностью превращается во внутреннюю энергию; после удара тела движутся с одинаковой скоростью (т. е. как единое тело) либо покоятся.

При таком ударе выполняется только закон сохранения импульса, закон же сохранения механической энергии не соблюдается – механическая энергия частично или полностью переходит во внутреннюю.

Если зарядить пистолет пулей, то в сжатой при этом пружине будет запасена потенциальная энергия:

$$E_{\text{пруж}} = \frac{kb^2}{2} \quad (1)$$

где k - коэффициент упругости пружины, b - деформация пружины.

Предположим, что вся энергия сжатой пружины при выстреле полностью превращается в кинетическую энергию пули. Это означает, что мы пренебрегаем потерями энергии на преодоление трения между пулей и стволом пистолета и на сообщение кинетической энергии самой пружине. Учтем, кроме того, что геометрические размеры всех пуль одинаковы, а, значит, одинакова деформация пружины для любой пули и, следовательно, одинакова запасаемая пружиной потенциальная энергия. Тогда из закона сохранения механической энергии следует, что пули различных масс, вылетая из пружинного пистолета, должны иметь одинаковые кинетические энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{kb^2}{2} \quad (2)$$

где v - скорость пули после выстрела.

Из (2) получаем зависимость скорости пули после выстрела от ее массы:

$$v = b \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Поскольку величины b и k для всех пуль одинаковы, то график ожидаемой зависимости скорости пули v от $\sqrt{\frac{1}{m}}$ должен, согласно формуле (3), представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат.

Пролетев небольшое расстояние между пистолетом и маятником, пуля входит в пластилин, заполняющий цилиндр, и за счет вязкого трения быстро теряет скорость. При этом часть механической энергии пули расходуется на неупругую деформацию и превращается во внутреннюю энергию пластилина и пули, то есть пластилин и пуля нагреваются. Процесс удара является кратковременным. Если масса маятника достаточно велика по сравнению с массой пули ($M \gg m$), то за время удара он в силу своей инерционности не успевает выйти из положения равновесия. Это позволяет считать систему маятник-пуля в момент удара замкнутой в горизонтальном направлении, так как сила тяжести и сила натяжения подвеса направлены вертикально при вертикальном положении маятника.

Для замкнутой системы можно применить закон сохранения импульса:

$$mv = (M + m)u \quad (4)$$

где v - скорость пули до удара (при этом скорость маятника равна нулю), u - скорость, приобретенная системой маятник-пуля сразу после удара.

Маятник вместе с пулей, получив за счет неупругого удара импульс, отклоняется от положения равновесия на угол α . В процессе отклонения на маятник действуют сила тяжести (вниз) и сила упругости подвеса (перпендикулярно направлению мгновенной скорости маятника). Если пренебречь потерями энергии на трение в подвесе и на сопротивление воздуха, то работу при отклонении маятника совершает только гравитационная сила. Это позволяет воспользоваться законом сохранения механической энергии:

$$\frac{(M + m)u^2}{2} = (M + m)gh \quad (5)$$

где h - наибольшая высота, на которую поднимается маятник (рисунок 2).

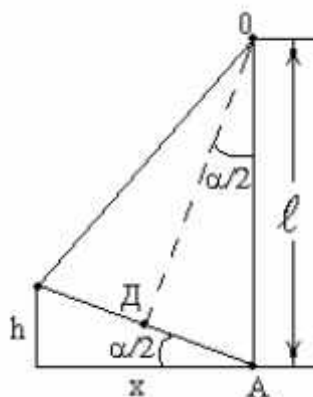


Рисунок 2 – Неупругий удар

Решая совместно уравнения (4) и (5) получим:

$$v = \frac{(M + m)}{m} x \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (6)$$

Таким образом, найдя значение высоты подъема маятника можно рассчитать скорость полета пули.

Методика эксперимента

Практическое измерение высоты подъема маятника затруднительно. Поэтому в лабораторном комплексе МУК-М1 предусмотрено измерение горизонтального смещения маятника x . Выразим высоту h через соответствующее горизонтальное смещение маятника x , которое удобнее измерять. Предположим, что угол отклонения маятника от положения равновесия α мал. Из рисунка 2 видно, что

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = hx = \frac{AD}{DO} \approx \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{AD}{DO} \approx \frac{x/2}{l} = \frac{x}{2l} \quad (7)$$

где l - длина нити подвеса. Из (7) получаем

$$h = \frac{x^2}{2l} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6) получим выражения для вычисления скорости пули v перед ударом:

$$v = \frac{(M + m)}{m} x \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет, осуществив прямые измерения смещения маятника x и, зная значения остальных величин, входящих в эту рабочую формулу, определить скорость пули v путем косвенных измерений. путем косвенных измерений. Измерив скорости для пуль с разными массами можно, следовательно, убедиться в справедливости теоретической зависимости (3).

Ход работы

1. Зарядите пружинный пистолет пулей с наибольшей массой.
2. Подготовьте устройство (см. рис. 1) к измерению горизонтального смещения маятника. Запишите численное значение начальной координаты маятника $x_{\text{нач}}$ по линейке отсчетного устройства N.
3. Осуществите первый выстрел, нажав пусковой рычаг пружинного пистолета. Запишите численное значение конечной координаты $x_{\text{кон}}$, определив его по линейке отсчетного устройства N. Вычислите смещение маятника при первом опыте:

$$x = |x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}|$$

4. Проведите измерения смещения маятника для пуль с другой массой, согласно пунктам 1-3 и запишите результаты в таблицу 1.

5. По формуле (9) рассчитайте значения скорости пули v для пуль с используемыми массами.

Таблица 1

$m \cdot 10^{-3}$ (кг)	$x_1 \cdot 10^{-3}$ (м)	$x_2 \cdot 10^{-3}$ (м)	$x_3 \cdot 10^{-3}$ (м)	$x_{\text{ср}}$ (м)	$\Delta x \cdot 10^{-3}$ (м)	$\varepsilon \%$
$m_g =$						
$m_{c1} =$						
$m_{c2} =$						

6. Рассчитайте относительные погрешности измерений и запишите результаты в таблицу 1.
7. Учитывая, что для проведенных опытов должна выполняться зависимость (3), постройте график зависимости в координатах $v = f(\sqrt{\frac{1}{m}})$ для диапазона численных значений, соответствующего используемым в опытах массам пуль и полученным для них скоростям..

Контрольные вопросы

1. Опишите модель баллистического маятника в данной работе. Применение баллистического маятника.
2. Дайте определение абсолютно упругого и неупругого ударов.
3. Сделайте вывод расчетной формулы скорости баллистического маятника (формула 6).
4. Расскажите о методике эксперимента.
5. Проанализируйте график зависимости в координатах $v = f(\sqrt{\frac{1}{m}})$. Сравните ход полученного графика с теоретическим.

Молекулярная физика. Термодинамика.

Лабораторная работа №7

Описание установки

Опыт проводится на лабораторном комплексе ЛКТ-2 (рисунок 1). Ниже рассмотрены основные элементы этого комплекса. Для начала работы на этом комплексе нам необходимо подключить его к электросети.



- 1 – каркас 600 мм с электропитанием; 2 – измерительная система ИСТ-4К; 3 – ящички с приборными блоками; 4 – компрессор; 4.1 – регулятор питания компрессора; 5 – баллоны V_1 и V_2 ; 6 – печь-термостат; 7 – модуль «Теплопроводность металлов»; 9 – блок «Свойства газов»; 10 – блок «Газ-жидкость»

Рисунок 1 – Общий вид установки ЛКТ-2

Компрессор – это устройство для сжатия и подачи воздуха или другого газа под давлением. Включая компрессор переключателем 4.1, мы нагоняем газ в баллоны. Давление газа на стенки баллонов нам и придется рассматривать в дальнейшем с помощью блока «Газ-жидкость» (рисунок 2).

В данном блоке будут задействованы манометр (2), разветвитель манометра (3), краны (4). Краны (4) служат в качестве клапанов, контролирующих подачу газа. Манометр (2) (от греч. *manos* - неплотный), прибор для измерений давления жидкости и газа. Манометр будет фиксировать показатели давления

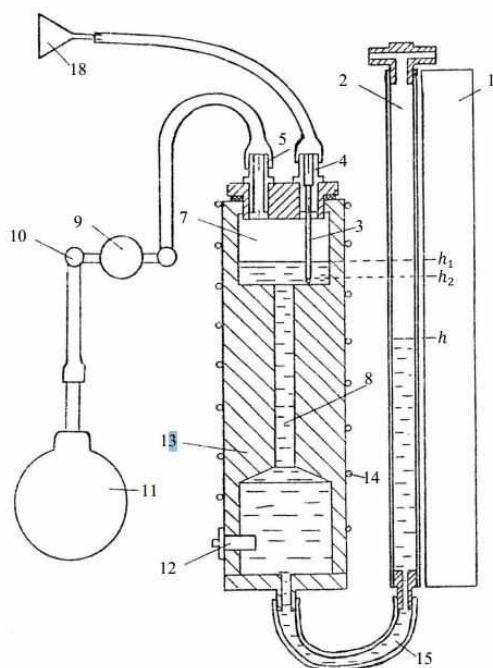
в баллонах с газом. Разветвитель манометра (3) служит для удобного присоединения к манометру элементов комплекса посредством резиновых трубок.



- 1 – модуль «Автоклав-манометр»;
- 2 – манометр;
- 3 – разветвитель манометра;
- 4 – краны.

Основным модулем для измерения поверхностного натяжения является «Автоклав-манометр» (рисунок 3) с ввернутым в него блоком дросселей. На рисунке 3 показано его осевое сечение в рабочем состоянии.

Рисунок 2 – Блок «Газ-жидкость»



Основная часть автоклава – трубка (13) с верхней и нижней полостями, соединенными круглым каналом (8). На трубке имеется нагревательная обмотка (14). В трубку ввернут датчик температуры (12). Полость автоклава соединена шлангом (15) с мерной трубкой (2), расположенной вдоль линейки (1), по которой отсчитываются координаты характерных точек прибора и уровни жидкости.

Рисунок 3 – Модуль «Автоклав-манометр»

На крышке автоклава (дросселе) имеется четыре штуцера (рисунок 4). Два из них (с одной и тремя рисками) закрываются пробками. Штуцер 4 (рисунок 4, (2)) (с двумя рисками) является верхним концом капилляра (3), открыт и сообщается с атмосферой. Штуцер 5 (рисунок 4, (1)) (без рисок) через кран (9) соединяется с резиновой грушей (11).

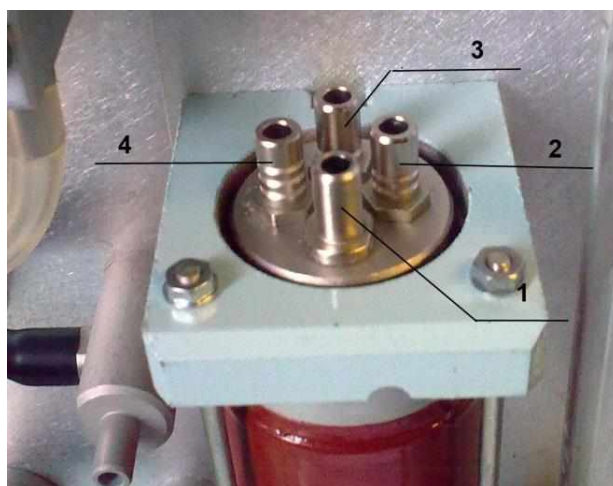


Рисунок 4 – Блок дросселей, ввернутый в автоклав

В нижней части лабораторного комплекса находится измерительная система ИСТ-2М (рисунок 5), с помощью которой осуществляется нагрев и измерение температуры жидкости.

На передней панели ИСТ-4К (рисунок 5) расположены следующие элементы схемы и органы управления.

«Сеть» (1) – тумблер включения сети.



Рисунок 5 – Измерительная система ИСТ-2М

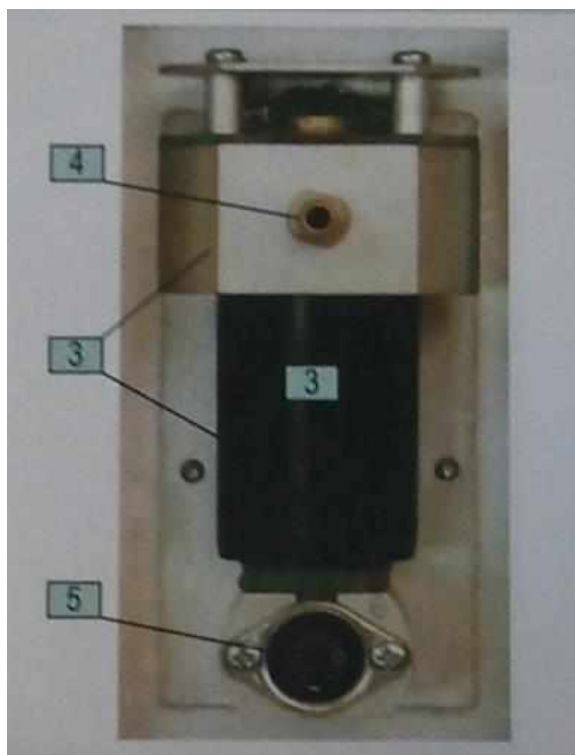
Н1 (2)– 4-разрядный цифровой индикатор. Его свечение свидетельствует о включении питания прибора.

«Т1» (3) - температура подключенного к системе датчика Д1 (поз.4) в Сс разрешением 0,1 градуса

«Т2» (5) - температура подключенного к системе датчика Д2 (поз.6) в Сс разрешением 0,1 градуса

«I1» (7)- ток питания нагревателя в миллиамперах

«U1» (8) - напряжение питания нагревателя в вольтах
 «P1» (9) - давление в манометре М1 типа MPX5050DP.
 «P2» (10) - давление в манометре М2 типа MPX5050DP.
 «Д1» (4) и «Д2» (6) - входы термометров для датчиков температуры. Эти входы включены параллельно соответствующим контактам разъема «объект».
 «Питание» (11) - блок управления источником питания нагревателя.
 «Общ» (12) и «U1» (13) - гнезда выхода источника питания нагревателя, дублирующие выход на разъем «Объект».
 «Вкл» (14) - подключение линии питания нагревателя к источнику питания U1.
 «Генератор» (поз.15) - органы управления источником питания U2.



Калориметр газовый (рисунок 6) предназначен для измерения теплоемкости воздуха методом нагревания струи. Он содержит трубу-теплообменник (рисунок 6, (1)), внутри которой размещен нагреватель (проволочная спираль) (рисунок 6, (2)) и выходной датчик температуры (Д1 на рисунке 6). Труба закреплена в корпусе (рисунок 6, (3)) со штуцером (рисунок 6, (4)), вблизи которого установлен входной датчик температуры (Д2 на рисунке 6). Все цепи выведены на разъем гнездо типа СГ-7 (рисунок 6, (5)), через который модуль подключается к ИСТ-4К.

Рисунок 6 – Модуль 07- «Калориметр газовый»

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные элементы лабораторного комплекса ЛКТ-2.
2. Назовите основные элементы блока «Газ-жидкость»?
3. Расскажите, для чего нужен блок дросселей, ввернутый в автоклав.
4. Расскажите о измерительной системе ИСТ-2М.
5. Расскажите о модуле «Калориметр газовый».

Лабораторная работа № 8
Изучение и применение изотермического процесса.
Проверка закона Бойля-Мариотта

Цель: Проверка закона Бойля-Мариотта.

Оборудование: Комплекс ЛКТ-2 (компрессор, манометр, баллон V_1 , баллон V_2 , краны 1-2, трубки, заглушки.

Краткая теория.

Идеальный газ – это теоретическая модель газа, в которой пренебрегают размерами и взаимодействиями частиц газа и учитывают лишь их упругие столкновения. Другими словами, предполагается, что внутренняя энергия идеального газа определяется лишь кинетической энергией его частиц, т.е. потенциальной энергией взаимодействия молекул пренебрегают.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров газа (давление (P), объем (V), температура (T)), называются изопроцессами. В идеальном газе эти процессы подчиняются газовым законам. Газовыми законами называются количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего параметра. Эти газовые законы вытекают из уравнения состояния идеального газа.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона) – это зависимость между параметрами идеального газа – давлением P , объемом V и абсолютной температурой T , определяющими его состояние, R – универсальная газовая постоянная, молярная масса газа – M :

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

Уравнение состояния также может быть выражено через другие параметры:

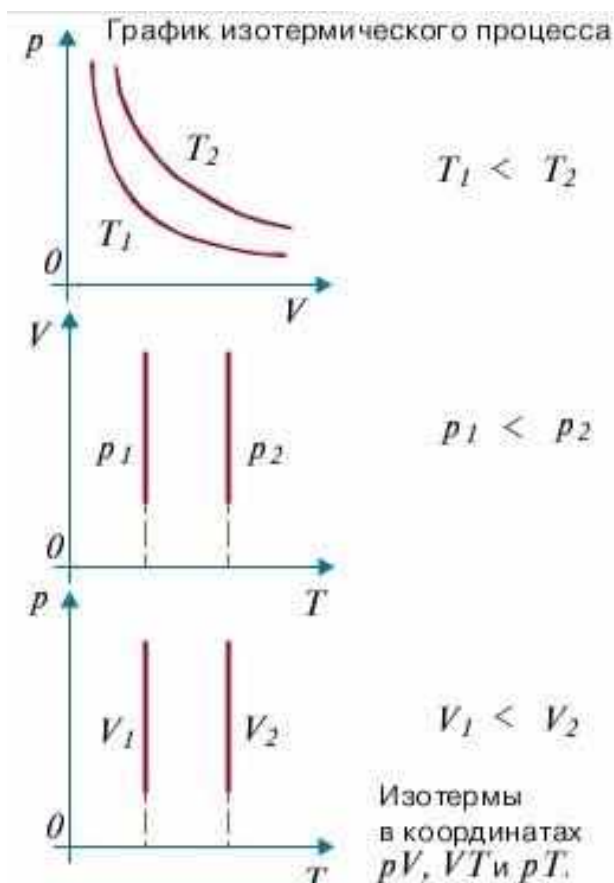
$$PV = \frac{N}{N_A} RT$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона объединяет газовые законы Гей-Люссака, Бойля-Мариотта, Шарля.

Закон Бойля-Мариотта – один из основных газовых законов. Описывает изотермические процессы в газе. Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называется изотермическим. Закон гласит: для данной массы произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется, т.е. $T = const$.

$$\boxed{PV = const}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \longrightarrow \quad P_1 \frac{m}{\rho_1} = P_2 \frac{m}{\rho_2} \quad \longrightarrow \quad \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2}$$
$$\boxed{\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}}$$



Этот закон был экспериментально открыт английским ученым Р. Бойлем, его сформулировал также французский ученый Э. Мариотт. Закон строго выполняется только для идеальных газов. Для реальных газов он выполняется достаточно хорошо при небольших давлениях и высоких температурах. Так, при давлении 100 атм и температуре 0°C отклонение измеренного значения PV от расчетного составляет 7%.

Графики зависимости $P(V)$ при $T = \text{const}$ называются *изотермами* и представляют собой равносторонние гиперболы. Чем выше температура, тем выше лежит соответствующая ей изотерма.

Закон Шарля.

Этот закон, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа: $\frac{P}{T} = \text{const}$ при $V = \text{const}$.

Согласно **закону Шарля**, давления P данной массы газа при постоянном объеме пропорционально температуре, т.е.

$$V = \text{const}.$$

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называется *изохорным*.

$$P = P_0(1 + \beta \Delta T)$$

β – температурный коэффициент давления; $[\beta] = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$

P - давление при T ; P_0 - давление при $T_0=273 \text{ K}$, $\Delta T = T - T_0$

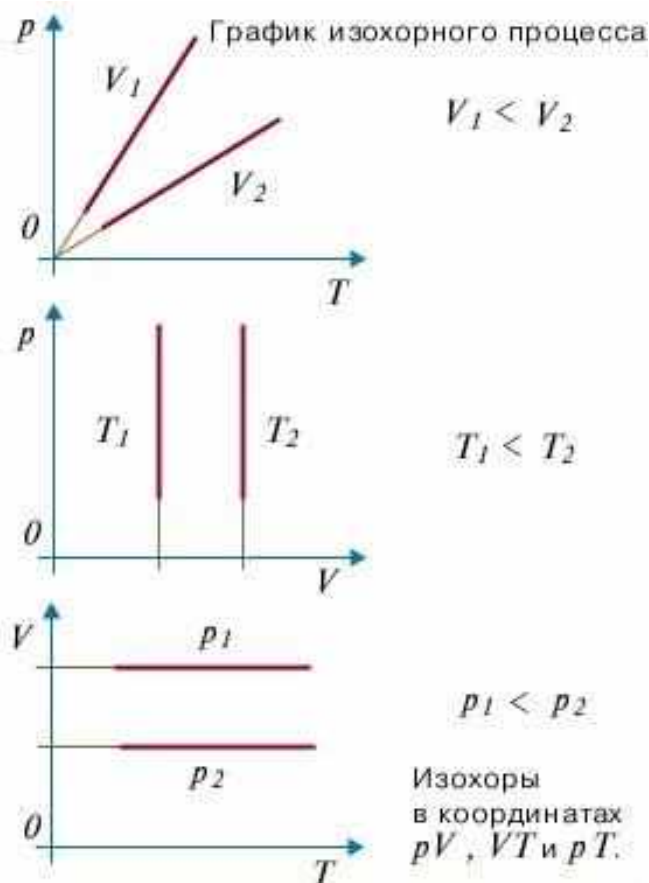
$$P = P_0(1 + \beta \Delta T) = P_0 \left(1 + \frac{1}{273} (T - T_0) \right) = P_0 \left(\frac{273 + T - 273}{273} \right) = P_0 T \frac{1}{273}$$

$$\boxed{P = \beta P_0 T}$$

$$P_1 = \beta P_0 T_1$$

$$P_2 = \beta P_0 T_2$$

$$\boxed{\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}}$$



Согласно закону, давление газа линейно зависит от температуры при постоянном объеме. Эта зависимость изображается прямой, которая называется *изохорой*. С ростом объема газа при постоянной температуре давление его, согласно закону Бойля-Мариотта, падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объему, лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объему.

Все изохоры начинаются в точке $T = 0$ (давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю). Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объема.

Закон Гей-Люссака

По **закону Гей-Люссака**, при постоянном давлении P и данной массы газа объем V идеального газа меняется линейно с температурой, т.е.

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta T)$$

где V_0 — начальный объем, ΔT — разность начальной и конечной температур. α — температурный коэффициент объемного расширения;

$$[\alpha] = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$$

V — давление при T ; V_0 — давление при $T_0 = 273 \text{ K}$, $\Delta T = T - T_0$

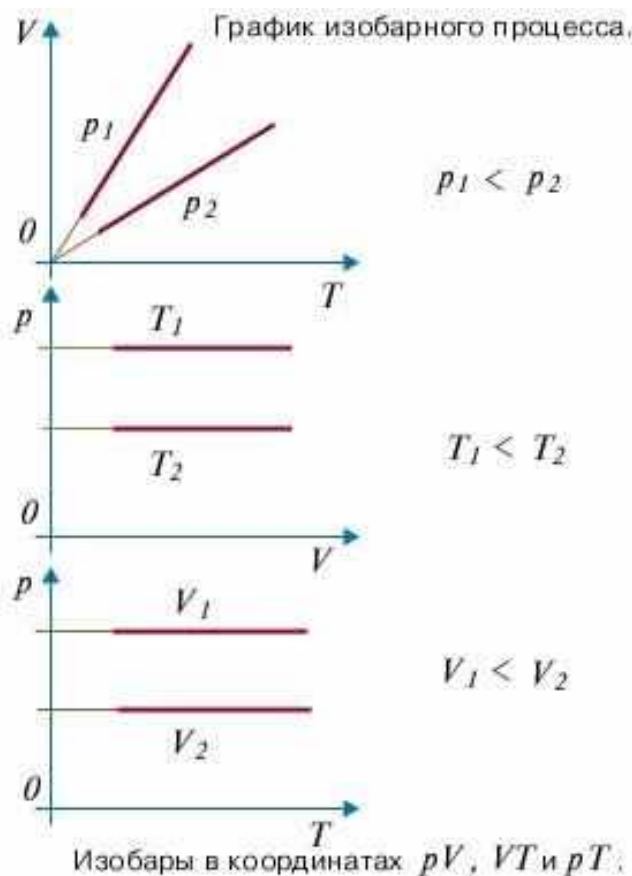
$$V = V_0(1 + \alpha\Delta T) = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} (T - T_0) \right) = V_0 \left(\frac{273 + T - 273}{273} \right) = V_0 T \frac{1}{273}$$

$$\boxed{V = \alpha P_0 T}$$

$$V_1 = \alpha P_0 T_1$$

$$V_2 = \alpha P_0 T_2$$

$$\boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}}$$



Таким образом, объем газа линейно зависит от температуры при постоянном давлении. Эта зависимость графически изображается прямой, которая называется *изобарой*.

Различным давлениям соответствуют разные изобары. С ростом давления объем газа при постоянной температуре, согласно закону Бойля-Мариотта, уменьшается, поэтому изобара, соответствующая более высокому давлению P_2 , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению P_1 .

В области низких температур все изобары идеального газа сходятся в точке $T = 0$, но это не означает, что объем реального газа действительно обращается в нуль.

При низких температурах все газы обращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния не применимо.

Адиабатным называется процесс изменения состояния газа, который происходит без теплообмена с окружающей средой. Так как $dQ=0$, то уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса будет иметь вид:

$$dU + PdV = 0$$

или

$$\Delta U + A = 0$$

Следовательно,

$$\Delta U = -A.$$

В адиабатном процессе работа расширения совершается только за счет расходования внутренней энергии газа, а при сжатии, происходящем за счет действия внешних сил, вся совершаемая ими работа идет на увеличение внутренней энергии газа.

Обозначим теплоемкость в адиабатном процессе через $c_{ад}$, и условие $dQ=0$ выразим следующим образом: $dQ = c_{ад}dT = 0$

Это условие говорит о том, что теплоемкость в адиабатном процессе равна нулю ($c_{ад} = 0$).

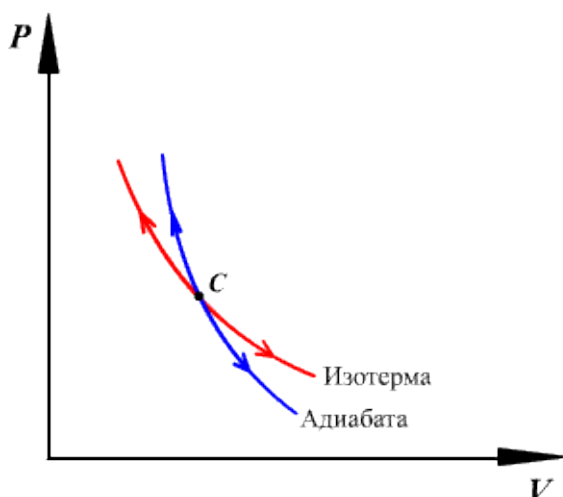
Известно, что

$$\frac{c_p}{c_v} = \gamma$$

где c_p и c_v — теплоёмкости при постоянном давлении и объёме.

Тогда уравнение кривой адиабатного процесса (адиабаты) имеет вид:

$$PV^\gamma = \text{const}$$



В этом выражении γ носит название **показателя адиабаты** (так же ее называют коэффициентом Пуассона). График адиабатного процесса — более крутая кривая, чем гипербола при изотермическом процессе. В этом выражении γ носит название **показателя адиабаты** (так же ее называют коэффициентом Пуассона). График адиабатного процесса — более крутая кривая, чем гипербола при изотермическом процессе.

Описание установки



Рисунок 1 – Установка ЛКТ – 2

- 1 - Каркас
- 2 - Измерительная система ИСТ-4
- 3 - Блок приборный (мультиметр, часы таймер)
- 4 - Компрессор
- 5 - Блок баллонов
- 6 - Печь термостат
- 7 - Модуль теплопроводность материалов
- 8 - Модуль калориметр балластный
- 9 - Блок «Свойства газов»
- 10 - Блок «Газ-жидкость»

11 - Выход разветвителя от баллона Б1, Б2 и компрессора К.

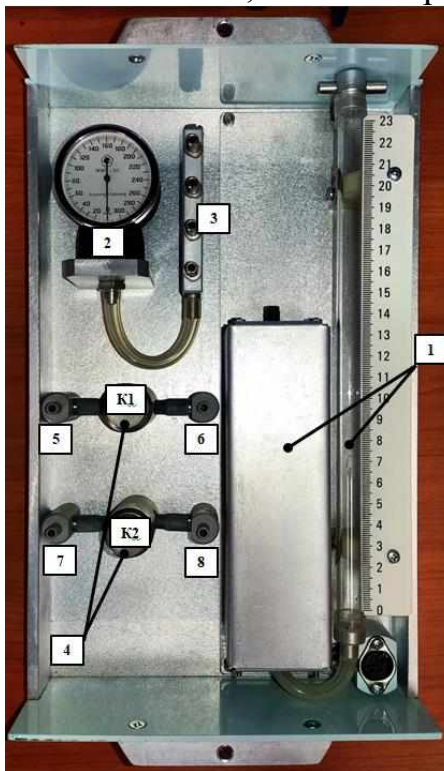


Рисунок 2 – Блок «Газ-жидкость»

1-автоклав-манометр; 2- манометр; 3- разветвитель манометра; 4- два крана К1 и К2 со штуцерам 5, 6, 7, 8.

Ход работы

1. Закрепляем ящик-модуль, изображенный на рисунке 2, крепежными гайками (рис. 3 (4) и (5)).

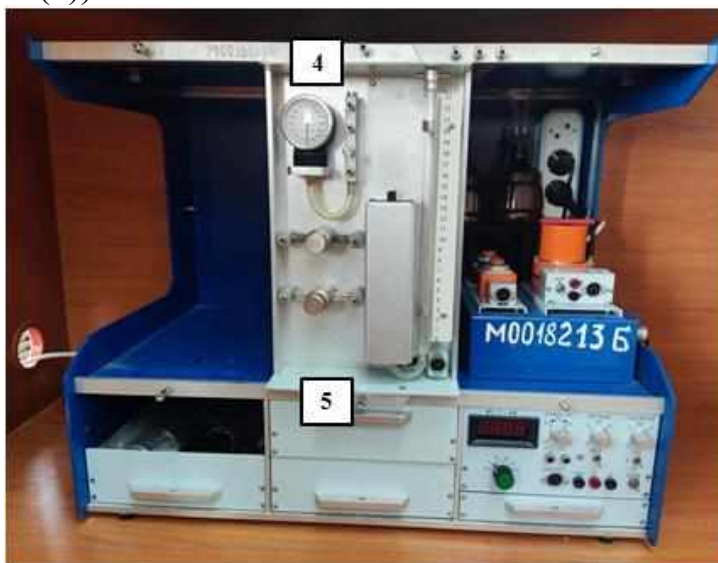


Рисунок 3 – Ящик-модуль «Газ-жидкость» на каркасе

2. С помощью трубок подключить к разветвителю манометра (рисунок 3, деталь 3) баллон Б1 (см. рисунок ниже), кран К1 в точке 6 (рисунок 3) и кран К2 в точке 8 (рисунок 3)

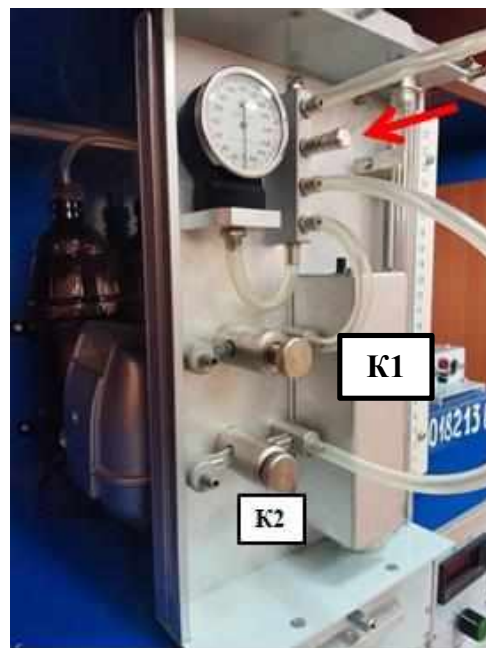
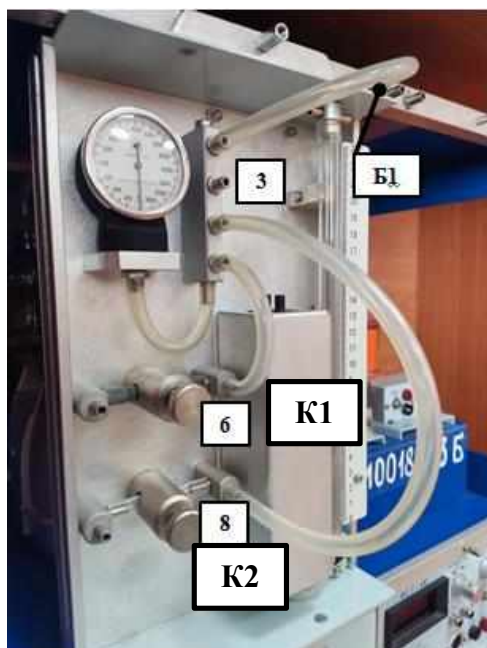


Рисунок 3 – Подключение трубок к разветвителю манометра

1. Перекрыть кран К2 поворотом клапана по часовой стрелке до упора, заглушить незадействованный выход на распределителе манометра (рисунок 3, деталь 3) с помощью заглушки.
2. С помощью трубки к крану К1 в точке 5 (рисунок 4) подключить выход компрессора от баллона К в точке 11 (рисунок 1). Открыть кран К1, поворотом клапана против часовой стрелки.



Рисунок 4 – Подключение компрессора и баллона Б1 ($V_1=1\text{л}$)

3. Понизить до минимума питание компрессора поворотом цилиндрического регулятора 4.1 (рисунок 1) против часовой стрелки до упора. Включить компрессор 4 (рисунок 1), подняв вверх тумблер «ВКЛ» 4.2, как показано на рисунке ниже. Плавным поворотом цилиндрического регулятора по часовой стрелке увеличить питание компрессора до необходимого уровня, чтобы накачать в баллон Б1 воздух до давления P_1 , равного 120-200 мм рт. ст. Выключить компрессор по достижении необходимого давления опустив вниз тумблер «ВКЛ» 4.2, и, поворотом цилиндрического регулятора 4.1 против часовой стрелки снизить питание компрессора до минимума (рисунок 5).



Рисунок 5 – Выключение компрессора

4. Закрывать кран К1. Присоединить трубку к крану К2 в точке 7 (рисунок 6) и баллон Б2 и открыть клапана К2 путём поворота клапана против часовой стрелки.

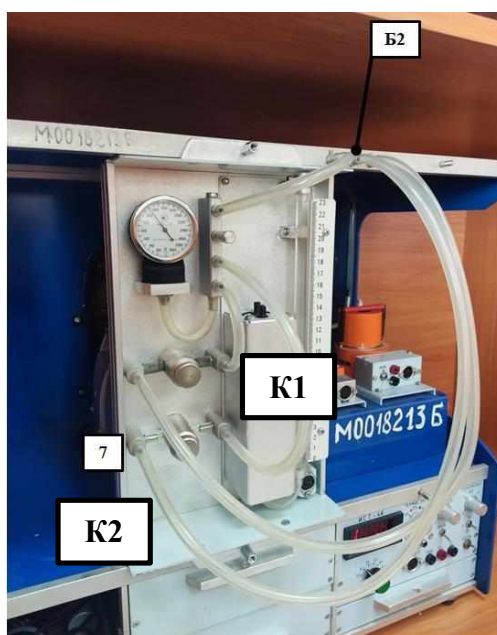


Рисунок 6 – Соединение клапана К2 с баллоном Б2 ($V_2=1\text{л}$)

5. Подождать пока стрелка манометра остановится и зарегистрировать значение давления P_2 экспериментальное во второй группе баллонов, объёмом V_2 . Учесть, что изначально во втором баллоне B_2 было атмосферное давление $P_{\text{атм.}}$.
6. Внести полученные данные в таблицу и с помощью формул проверить результаты с помощью расчетной формулы:

$$P_{\text{выч } 2} = \frac{P_1 V_1 + P_{\text{нач } 2} V_2}{V_1 + V_2}$$

Таблица

V_1 , л	V_2 , л	P_1 , мм рт. ст.	$P_{\text{нач}2}$, мм. рт. ст.	$P_{\text{экспер}2}$, мм рт. ст.	$P_{\text{выч}2.}$, мм рт. ст.
1,02	2,02		0		
			0		
			0		
			0		

Контрольные вопросы:

1. Какую зависимость отражает уравнение состояния идеального газа? Почему это уравнение также называют уравнением Менделеева-Клапейрона?
2. Сформулируйте и запишите закон Бойля-Мариотта. Какой процесс соответствует этому закону?
3. Сформулируйте и запишите закон Шарля. Какой процесс соответствует этому закону?
4. Сформулируйте и запишите закон Гей-Люссака. Какой процесс соответствует этому закону?
5. Выведите расчетную формулу $P_{\text{выч } 2} = \frac{P_1 V_1 + P_{\text{нач } 2} V_2}{V_1 + V_2}$

Лабораторная работа № 9

Определение размеров молекул по площади пятна

Цель: Изучение методики определения площади поперечного сечения и длины молекулы олеиновой кислоты.

Оборудование: Чашка объемом 3-4 литра, шприцы (№1, №2, №3), олеиновая кислота ($C_{12}H_{25}COOH$), этиловый спирт (C_2H_5OH), чистые флаконы, микропипетка со шкалой (рисунок 2), ванна размером 20x20 см (рисунок 3), вода, тальк (ликоподий, пудра, порошок мела), линейка измерительная, лист бумаги.

Краткая теория.

Молекула в современном понимании – это наименьшая частица вещества, обладающая всеми его химическими свойствами. Молекула способна к самостоятельному существованию. Простейшие молекулы состоят из одного атома: это молекулы инертных газов – гелия, неона, аргона, криптона, ксенона, радона. В так называемых высокомолекулярных соединениях и полимерах каждая молекула может состоять из сотен тысяч атомов. Молекула – устойчивая система, состоящая из ядер атомов и окружающих электронов, причем химические свойства молекулы определяются электронами внешних оболочек в атомах. Атомы в молекулах соединены друг с другом в определенной последовательности и определённым образом распределены в пространстве. Связи между атомами имеют различную прочность; она оценивается величиной энергии, которую необходимо затратить для разрыва межатомных связей. Молекулы характеризуются определёнными размером и формой. Различными способами было определено, что в 1 см^3 любого газа при нормальных условиях содержится около $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул (рисунок 1).

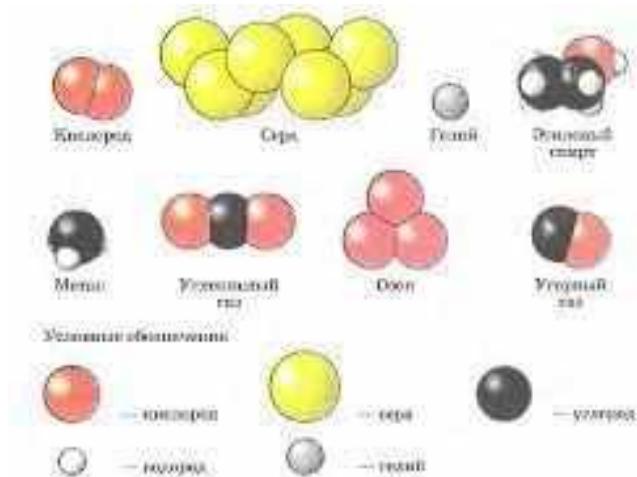


Рисунок 1 – Модели молекул разных веществ

Методы измерения диаметра молекул.

I способ. Основан на том, что молекулы вещества, когда оно находится в твердом или жидком состоянии, можно считать плотно прилегающими друг к

другу. В таком случае для грубой оценки можно считать, что объем V некоторой массы m вещества просто равен сумме объемов, содержащихся в нем молекул. Число молекул в теле массой m равно, как известно, $N = N_A \frac{m}{M}$, где M — молярная масса вещества N_A — число Авогадро. Отсюда объем V_0 одной молекулы определяется из равенства $V_0 = \frac{V}{N} = \frac{V \cdot M}{m \cdot N_A}$. В это выражение входит отношение объема вещества к его массе. Обратное же отношение $\frac{m}{V} = \rho$ есть

плотность вещества, так что $V_0 = \frac{M}{\rho \cdot N_A}$. Плотность практически любого веще-

ства можно найти в доступных всем таблицах. Молярную массу легко определить, если известна химическая формула вещества. Объем одной молекулы, если считать ее шариком, равен $V_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$, где r - радиус шарика. Поэтому

$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = \frac{M}{\rho \cdot N_A}$, откуда мы и получаем выражение для радиуса молекулы:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M}{4\pi \cdot \rho \cdot N_A}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi \cdot N_A}} \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}}$$

Первый из этих двух корней — постоянная величина, равная $\approx 7,4 \cdot 10^{-9}$ моль^{1/3}, поэтому формула для r принимает вид

$$r \approx 7,4 \cdot 10^{-9} \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}}.$$

Например, радиус молекулы воды, вычисленный по этой формуле, равен $r_B \approx 1,9 \cdot 10^{-10}$ м. *Описанный способ определения радиусов молекул не может быть точным уже потому, что шарики нельзя уложить так, чтобы между ними не было промежутков, даже если они соприкасаются друг с другом.*

II способ. Метод Ленгмюра и Дево. В данном методе исследуемая жидкость должна растворяться в спирте (эфире) и быть легче воды, не растворяясь в ней. При попадании капли раствора на поверхность воды спирт растворяется в воде, а исследуемая жидкость образует пятно площадью S и толщиной d (порядка диаметра молекул).

Если допустить, что молекула имеет форму шара, то объем одной молекулы равен:

$$V = \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} \approx \frac{d^3}{2} \text{ где } d - \text{молекулы.}$$

Необходимо определить диаметр молекулы d . В микропипетку набрать 0,5 мл раствора и, расположив ее над сосудом, отсчитать число капель n , содержащихся в этом объеме. Прodelав опыт несколько раз, найти среднее значение числа капель в объеме 0,5 мл, а затем подсчитать объём исследуемой жидкости в капле: $V = \frac{0,5}{n \cdot 100} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, где n — число капель в объеме 0,5 мл, 1:400

— концентрация раствора.

В ванну налить воду толщиной 1 – 2 см. Насыпать тальк тонким слоем на лист бумаги, ударяя слегка пальцем по коробочке. Расположив лист бумаги выше и сбоку от ванны на расстоянии 10 – 20 см, тальк сдуть с бумаги. На поверхность воды в ванне из пипетки капнуть одну каплю раствора. Линейкой измерить, средний диаметр образовавшегося пятна D и подсчитываю его площадь. Опыт повторить 2- 3 раза, а затем подсчитать диаметр молекул d .

III способ. Определение диаметра молекулы. Будем считать, что капля масла растекается по воде до тех пор, пока толщина масляной плёнки не станет равной одной молекуле, тогда диаметр одной молекулы можно определить по формуле: $d=V/S$, где V – объём капли масла, S - площадь масляного пятна. Объём капли масла можно определить следующим образом: накапать 100 капель из капилляра в сосуд и измерить массу масла в нём. После этого массу, выраженную в килограммах, поделить на плотность масла, которую можно взять из таблицы плотности некоторых веществ (плотность масла растительного 800 кг/м^3). Затем полученный результат поделить на количество капель. Объём капли можно определить также с помощью мерного цилиндра: накапать масло в цилиндр, измерить его объём в см^3 и перевести в м^3 , для чего поделить на 1000000, затем на количество капель масла. После того, как объём капли стал известен нужно капнуть одну каплю масла на поверхность воды, которая налита в широкий сосуд. Для ускорения реакции предварительно немного нужно нагреть воду – приблизительно до 40°C . Масло начнёт растекаться, и в результате получится круглое пятно. После того, как пятно перестанет расширяться, с помощью линейки измерить его диаметр и рассчитать площадь пятна по формуле:

$$S_{\text{пятна}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{пятна}}^2}{4}$$

IV способ. Строение молекул изучают различными экспериментальными методами. Электронография, нейтронография и рентгеновский структурный анализ позволяют получать непосредственную информацию о структуре молекул. *Электронографии*, метод, исследующий рассеяние электронов на пучке молекул в газовой фазе, позволяет рассчитать параметры геометрической конфигурации для изолированных сравнительно простых молекул. *Нейтронография и рентгеновский* структурный анализ ограничены анализом структуры молекул либо отдельных упорядоченных фрагментов в конденсированной фазе. *Рентгенографические исследования* кроме указанных сведений дают возможность получить количественные данные о пространственном распределении электронной плотности в молекулах. *Спектроскопические методы* основаны на индивидуальности спектров химических соединений, которая обусловлена характерным для каждой молекулы набором состояний и отвечающих им энергетических уровней. Эти методы позволяют проводить качественный и количественный спектральный анализ веществ.

Линейный размер молекулы или атома можно найти различными способами. Например, с помощью *электронного микроскопа*, получены фотографии некоторых крупных молекул, а с помощью ионного проектора (ионного

микроскопа) можно не только изучить строение кристаллов, но определить расстояние между отдельными атомами в молекуле. Используя достижения современной экспериментальной техники, удалось определить линейные размеры простых атомов и молекул, которые составляют около 8-10 см. Линейные размеры сложных атомов и молекул намного больше. Например, размер молекулы белка составляет $43 \cdot 10^{-8}$ см. **Атомный радиус** – это сфера, в которой заключена основная часть электронной плотности атома (не менее 90...95%).

Моль вещества

Массы отдельных молекул и атомов очень малы, поэтому в расчётах удобнее использовать не абсолютные значения масс, а относительные.

Относительная молекулярная масса (или **относительная атомная масса**) вещества M_r – это отношение массы молекулы (или атома) данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода.

$$m_r = \frac{m_0}{\frac{m_{0C}}{12}}$$

где m_0 – масса молекулы (или атома) данного вещества, m_{0C} – масса атома углерода.

Относительная молекулярная (или атомная) масса вещества показывает, во сколько раз масса молекулы вещества больше $\frac{1}{12}$ массы изотопа углерода C_{12} .

Относительная молекулярная (атомная) масса выражается в атомных единицах массы. **Атомная единица массы** – это $\frac{1}{12}$ массы изотопа углерода C_{12} . Точные измерения показали, что атомная единица массы составляет $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг, то есть: $1 \text{ а.е.м.} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Относительная молекулярная масса вещества может быть вычислена путём сложения относительных атомных масс элементов, входящих в состав молекулы вещества. Относительная атомная масса химических элементов указана в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева. В периодической системе Д.И. Менделеева для каждого элемента указана **атомная масса**, которая измеряется в атомных единицах массы (а.е.м.). Например, вес атома магния в килограммах будет:

$$m_{0Mg} = 24,305 \cdot 1 \text{ а.е.м.} = 24,305 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 40,3463 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Количество вещества принято считать пропорциональным числу частиц. **Количество вещества** – это физическая величина, характеризующая относительное число молекул и атомов в теле. Единица количества вещества называется **молем** (моль). **Моль** равен количеству вещества системы, в которой содержится столько же молекул, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода C_{12} . То есть, если у нас есть система с каким-либо веществом, и в этой системе столько же молекул этого вещества, сколько атомов в 0,012 кг углерода, то мы можем сказать, что в этой системе у нас **1 моль вещества**.

Постоянная Авогадро

Количество вещества ν равно отношению числа молекул в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода, то есть количеству молекул в 1 моле вещества.

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

где N – количество молекул в данном теле, N_A – количество молекул в 1 моле вещества, из которого состоит тело. N_A – это постоянная Авогадро. Количество вещества измеряется в молях.

Постоянная Авогадро – это количество молекул или атомов в 1 моле вещества.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Молярная масса – это масса вещества, взятого в количестве одного моля:

$$\mu = m_0 \cdot N_A$$

где m_0 – масса молекулы. Молярная масса выражается в килограммах на моль ($\text{кг/моль} = \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$). Молярная масса связана с относительной молекулярной массой соотношением:

$$\mu = 10^{-3} \cdot M_r [\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$$

Масса любого количества вещества m равна произведению массы одной молекулы m_0 на количество молекул:

$$m = m_0 \cdot N = M_0 \cdot N_A \cdot \nu = \mu \cdot \nu$$

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{\mu}$$

Массу одной молекулы вещества можно найти, если известны молярная масса и постоянная Авогадро:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu \cdot N_A} = \frac{\mu}{N_A}$$

Более точное определение массы атомов и молекул достигается при использовании масс-спектрометра – прибора, в котором происходит разделение пучком заряженных частиц в пространстве в зависимости от их массы заряда при помощи электрических и магнитных полей.

Для примера найдём молярную массу атома магния. Как мы выяснили выше, масса атома магния равна $M_{0Mg} = 40,3463 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Тогда молярная масса будет:

$$\mu = M_{0Mg} \cdot N_A = 40,3463 \cdot 10^{-27} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 2,4288 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

То есть в одном моле «помещается» $2,4288 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$ магния. Ну или примерно 24,28 грамм. Как видим, молярная масса (в граммах) практически равна атомной массе, указанной для элемента в таблице Менделеева. Поэтому, когда указывают атомную массу, то обычно делают так: атомная масса магния равна 24,305 а.е.м. (г/моль).

Описание установки

ЛКТ 2 комплекс «Размеры молекул» (рисунок 2), состоящий из: 1 - тальк (пудра, порошок мела, присыпка, ликоподий), 2 - олеиновая кислота

($C_{12}H_{33}COOH$), 3 - спирт этиловый (C_2H_5OH), 4 - шприцы с бирками, 5 и 6 - чистые флаконы.



Рисунок 2 — ЛКТ 2 комплекс «Размеры молекул»

Ход работы

1. Элементы комплекта РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ (рисунок 2) (спирт этиловый (C_2H_5OH), олеиновая кислота ($C_{12}H_{33}COOH$), шприцы с бирками, тальк (присыпка, пудра, лycopодий, порошок мела), чистые флаконы) размещаем для проведения опытов на рабочем столе.
2. Приготовим спиртовой раствор олеиновой кислоты с концентрацией $C=0,3\%=3 \cdot 10^{-3}$ по объему. Для этого:
 - отмерим шприцем №1 (рисунок 3) в чистый флакон объем $V_1=2$ мл спирта;
 - с помощью шприца №2 (рисунок 3) измерим объем $V_K = \frac{V_2}{N_2}$ выдавливаемых шприцем каплеь кислоты, для чего набрать кислоту из флакона и медленно выдавить обратно в флакон N_2 каплеь кислоты общим объемом V_2 (ориентировочно $N_2=40$, $V_2=5\text{мм}^3$).



Рисунок 3 — Набор шприцев



Рисунок 4 — Ванна 20x20 см

- накапать нужное количество $N_0 = C \cdot \frac{V_1}{V_K}$ каплеь кислоты в флакон со спиртом;
 - закрыть флакон и взболтать жидкость.
3. Определяем количество молекул в капле раствора:

- с помощью шприца №3 (рисунок 3) определяем объем V_p выдавливаемых шприцем капель спиртового раствора кислоты: $V_p = \frac{V_3}{N_3}$;
 - определим объем V кислоты в капле раствора $V = \frac{N_0 \cdot V_p \cdot V_k}{V_1}$;
 - определим количество молекул N в капле раствора: $N = \frac{D \cdot V \cdot N_A}{M}$, где N_A – число Авогадро.
4. В ванну размером 20x20 см (рисунок 4) набираем воду (толщина слоя 2-3 см).
 5. Насыпаем сверху тонкий слой талька (рисунок 5).



Рисунок 5 – Слой талька на поверхности воды Рисунок 6 – Пятно раствора олеиновой кислоты

6. Из шприца №3 наносим каплю спиртового раствора олеиновой кислоты.
7. Измерим размеры линейкой и определим площадь пятна (рисунок 6).
8. Оценим поперечный размер молекулы: $d = \left(\frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}}$.
9. Подсчитаем длину молекулы пятна: $h = \frac{V}{S}$.
10. Запишем контрольные результаты в таблицу 2.

Таблица

V_1		N		V_k		N_0		h	
V_2		N_2		V_p		S			
V_3		N_3		V		d			

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные методы определения размеров молекул.
2. Опишите метод, согласно которому мы определили размер молекулы.
3. По какой формуле можно определить массу одной молекулы вещества? Какие предположения о форме молекулы мы использовали при расчете ее размеров?
4. Как обозначается количество вещества и в чем оно измеряется? Дайте определение молярной массы. По какой формуле высчитывается молярная масса сложного вещества?
5. Каково значение постоянной Авогадро? Какая зависимость существует между количеством вещества, числом молекул и постоянной Авогадро?

Лабораторная работа № 10

Теплота плавления, приращение энтропии

Цель: 1) Определить теплоту плавления парафина и сплава Розе; 2) Вычислить приращение энтропии.

Оборудование: Лабораторный комплекс ЛКТ-7 (печь-термостат); тигель алюминиевый; теплоизолирующий кожух; секундомер; весы.

Краткая теория.

Простой и доступный метод наблюдения фазовых переходов (плавление твердого вещества) позволяет быстро оценить степень чистоты кристаллического вещества и идентифицировать его по температуре плавления.

Температура плавления и отвердевания — температура, при которой твёрдое кристаллическое тело совершает переход в жидкое состояние и наоборот. При температуре плавления вещество может находиться как в жидком, так и в твёрдом состоянии. При подведении дополнительного тепла вещество перейдёт в жидкое состояние, а температура не будет меняться, пока всё вещество в рассматриваемой системе не расплавится. При отведении лишнего тепла (охлаждении) вещество будет переходить в твёрдое состояние (застывать) и, пока оно не застынет полностью, температура не изменится. На рисунке 1 показан вид кривой нагревания и охлаждения кристаллического вещества.

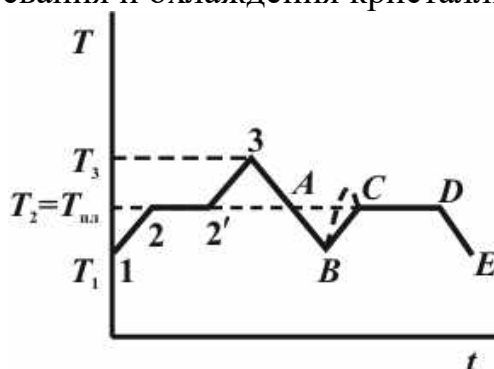


Рисунок 1 — Реальный график нагревания и охлаждения кристаллического вещества

В твердой фазе тело, поглощая энергию, нагревается (участок 1 — 2 кривой), скорость и энергия теплового движения молекул в узлах кристаллической решетки возрастает. При достижении температуры плавления (точка 2) скорость движения молекул становится настолько большой, что их энергия оказывается достаточной для разрыва связей кристаллической решетки, тело начинает плавиться, часть его переходит в жидкую фазу. При дальнейшем поглощении энергии телом средняя скорость молекул образовавшейся жидкой фазы не увеличивается, температура тела не меняется (участок 2 — 2'), поскольку эти молекулы передают энергию от нагревателя к частицам твердой фазы, вызывая дальнейшее плавление кристаллического вещества. Поглощаемая при этом энергия идет на увеличение потенциальной энергии частиц. Дальнейшее увеличение температуры вещества (участок 2' — 3) становится возможным после того, как все кристаллическое вещество полностью перейдет в жидкую фазу.

Если расплавленное вещество, нагретое до температуры $T_3 > T_{\text{пл}}$, охладить до $T_2 = T_{\text{пл}}$ (участок 3 — А), то при отсутствии в расплавленном веществе центров кристаллизации (крупинок, пылинок и т. д.) и в спокойном состоянии (без вибраций, резких толчков) молекулы расплава не могут образовать кристаллических связей с соседними молекулами из-за того, что полная энергия этих молекул больше, чем энергии связи. Для того чтобы могла начаться кристаллизация, необходимо уменьшить энергию молекул. Это достигается некоторым переохлаждением расплавленного вещества (участок А — В). Процесс кристаллизации (начало в точке В) развивается настолько быстро, что энергия, которая выделяется при кристаллизации, вызывает нагрев вещества (участок В — С). Кристаллизация замедляется и только при температуре $T_2 = T_{\text{пл}}$ наступает равновесие — теплота, отданная в окружающую среду, равна теплоте, которая выделяется при кристаллизации. Процесс кристаллизации продолжается (участок С — D). Иногда при кристаллизации переохлажденного расплава происходит разогрев вещества до температуры более высокой, чем $T_{\text{пл}}$ (пунктирная кривая В — С). После окончания процесса кристаллизации (точка D) образовавшаяся твердая фаза начинает остывать (участок D — E). Из сказанного, следует, что температура плавления кристаллического вещества равна температуре его кристаллизации.

Реальный график нагревания и охлаждения кристаллического вещества немного отличается от показанного на рис.1. У него нет резких переходов. Охлаждение при высоких температурах идёт быстрее, чем при низких, поэтому график охлаждения — нелинейный. Кривая охлаждения кристаллического вещества показана на рисунке 2.

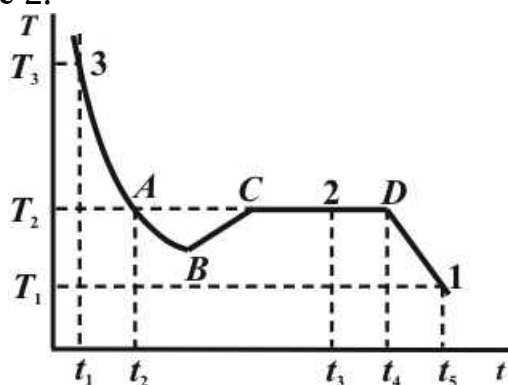


Рисунок 2 — Кривая охлаждения кристаллического вещества

Чистое вещество плавится в узком интервале температур — от несколько десятых долей градуса до одного. Незначительные загрязнения понижают температуру плавления данного соединения. За счет примесей также происходит расширение интервала температур плавления. Это явление используют, устанавливая идентичность двух веществ (из которых одно известно) с одинаковой температурой плавления. Для этого смешивают вещества в равных количествах и определяют температуру плавления смеси. Если температура смеси остается неизменной по отношению к исходным компонентам, то делают вывод об идентичности сравниваемых веществ. Если температура плавления смеси ниже температуры плавления исходных веществ, то велика вероятность

того, что имеем дело с разными соединениями. Однако отсутствие понижения точки плавления для смесей еще не является абсолютным доказательством идентичности известного и неизвестного веществ. Следует помнить, что большой интервал плавления может быть не только у сильно загрязненных, но и у разлагающихся веществ. Температура плавления зависит от строения вещества. Так, вещества линейного строения имеют более высокие температуры плавления, чем их изомеры с разветвленным углеводородным скелетом. Вещества, способные образовывать водородные связи, плавится при более высоких температурах, чем изомерные им вещества, не образующие водородных связей.

Термодинамическая энтропия. Приращение энтропии.

Понятие термодинамической энтропии, впервые введенное Клаузиусом, имеет ключевое значение для понимания основных положений термодинамики. Рассмотрим обратимый круговой термодинамический процесс, представленный на рис. 3. Для этого процесса может быть записано равенство Клаузиуса (1) в виде:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (1)$$

$$\int_{I^{1 \rightarrow 2}}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{II^{2 \rightarrow 1}}^2 \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (2)$$

где первый интеграл берется по траектории I, а второй – соответственно по траектории II.

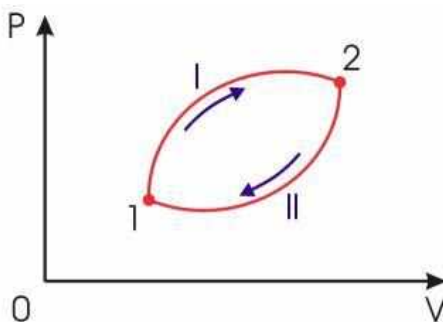


Рисунок 3 – Обратимый круговой термодинамический процесс

Изменение направления протекания процесса $1 \rightarrow 2$ на противоположное $2 \rightarrow 1$, что можно выполнить вследствие обратимости процесса II, приводит к замене знака перед вторым интегралом формулы (2). Выполнение этой замены и перенос второго интеграла в выражении (2) в правую часть дают:

$$\int_{I^{1 \rightarrow 2}}^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_{II^{1 \rightarrow 2}}^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (3)$$

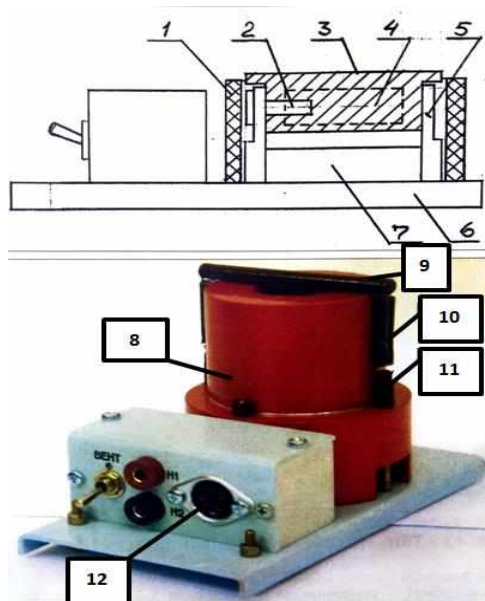
Из полученного выражения следует, что для обратимых процессов интеграл $\int_{\text{обр}^{1 \rightarrow 2}}^2 \frac{\delta Q}{T}$ не зависит от конкретного вида траектории, по которой происходит процесс, а определяется только начальным и конечным равновесными состояниями термодинамической системы. С аналогичной ситуацией мы уже встречались, когда в механике рассматривали определение работы консервативной силы. Независимость работы консервативной силы от формы траектории движения тела позволила ввести функцию, названную потенциальной энергией, которая зависит только от состояния механической системы и не зависит от

того, как в это состояние система была переведена. Из этой аналогии следует, что элементарное приведенное количество теплоты $\frac{\delta Q}{T}$ должно представлять собой полный дифференциал некоторой функции S , зависящей только от состояния термодинамической системы, то есть: $dS = \frac{\delta Q}{T}$ (4)

Тогда интеграл $\int_{\text{обр}^{1 \rightarrow 2}} \frac{\delta Q}{T}$ будет равен разности значений функции S в равновесных состояниях 1 и 2: $S_2 - S_1 = \int_{\text{обр}^{1 \rightarrow 2}} \frac{\delta Q}{T}$ (5)

Итак, величина S является функцией, зависящей только от равновесного состояния термодинамической системы. Она не зависит от конкретного вида термодинамического процесса, приведшего систему в указанное состояние. Эта функция была названа термодинамической энтропией. Выражения (4) и (5) дают математическую формулировку сформулированного выше определения термодинамической энтропии. Из выражения (5) следует, что термодинамическая энтропия, так же как и потенциальная энергия, определяется с точностью до произвольной постоянной. Это связано с тем, что формула (5) не позволяет определить абсолютное значение термодинамической энтропии, а дает только разность энтропий для двух равновесных состояний, как суммарную приведенную теплоту в обратимом термодинамическом процессе, переводящем систему из одного состояния в другое. Термодинамическая энтропия, введенная выше, применима для описания равновесного состояния термодинамической системы. Для нахождения энтропии термодинамической системы, находящейся в квазиравновесном состоянии, при котором можно считать, что её отдельные части (подсистемы) находятся в состоянии равновесия, можно воспользоваться свойством аддитивности энтропии: $S = \sum_{i=1}^N S_i$ (6) где: S_i – энтропии подсистем, N – число подсистем.

Описание установки



Модуль 01 ПЕЧЬ-ТЕРМОСТАТ (рисунок 4) состоит из плиты 3, установленной на основании прибора 6 на ножках 5, и окруженной теплоизолирующим кожухом.

В плиту встроены два тепловыделяющих элемента (ТВЭЛ) 4 и датчик температуры. Плита может охлаждаться вентилятором 7. Сопротивление ТВЭЛ печи равно 10 Ом, максимальное напряжение питания - 20 В, максимальная мощность - 40 Вт.

Изучаемый (нагреваемый) объект устанавливается на плите и прижимается к ней стержнем 9 с помощью двух пружин 10.

Рисунок 4 – Печь-термостат

На объект надевается теплоизолирующий кожух (поз. 8). Через разъем 12 модуль подключается к разъему ОБЪЕКТ ИСТ-4.

Тумблер "ВЕНТ" включает вентилятор. Тумблер "ВЕНТ" включает вентилятор. Гнезда "Н1" и "Н2" включены параллельно нагревателю и используются для измерения напряжения на нагревателе при необходимости точного определения выделяемой в нагревателе мощности (вольтметр измерительной системы ИСТ-4 не учитывает падение напряжения на проводах кабеля, что приводит к небольшой погрешности в определении мощности).

основании прибора 6 на ножках 5, и окруженной теплоизолирующим кожухом.

Ход работы

1. Взвешиваем сплав Розе объемом 30 мл вместе с тигелем (масса пустого тигеля $60,0 \pm 0,5$ г) (рисунок 5а) и (рисунок 5б).



Рисунок 5а – Пустой тигель массой 60 г



Рисунок 5б – Сплав Розе массой 30 г

2. Нанесем на плиту (3, рисунок 6 а) 2-3 капли глицерина для теплового контакта.
3. Разместим тигель со сплавом на плиту (3, рисунок 6 б) и прижмем её стержнем.

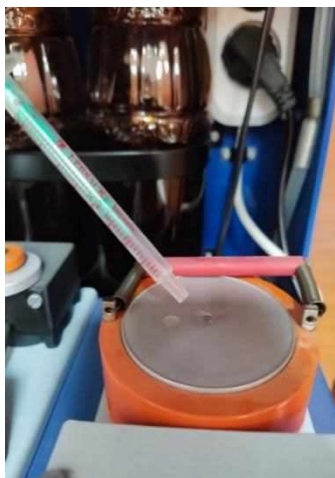


Рисунок 6 а – Капли глицерина для теплового контакта



Рисунок 6 б – Сплав Розе после выполнения эксперимента

4. Выставить датчик питания U1 (1, рисунок 7) на 20 В.
5. Поставить термостат T1 (2, рисунок 7) на отметку 120.
6. Включить секундомер при прохождении температуры 30° и нажимать кнопку «SET» («круг») при показаниях температуры: 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 102, 104, 106, 108, 110, 112, 114, 116, 118, 120.
7. Выключить термостат «ВКЛ» опустить вниз и включить тумблер «ВЕНТ» (14, рисунок 7а, 7б).
8. Включить секундомер и нажимать кнопку «SET» («круг») при тех же температурах.

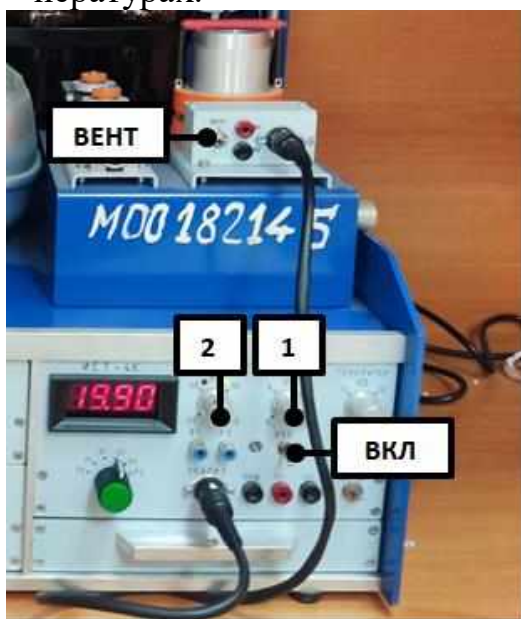


Рисунок 7а – включение термостата



Рисунок 7б – ИСТ-4К, включение тумблера

9. Занести результаты в таблицу 5.
10. Взвешиваем парафин (рисунок 8, рисунок 9) объемом 30 мл в тигеле (масса пустого тигеля $60,0 \pm 0,5$ г).



Рисунок 8 – Парафин



Рисунок 9 – Парафин после выполнения эксперимента

11. Проводив действия, описанные в подпунктах 2-9.
12. Построить графики нагревания и охлаждения, сопоставить их.
13. Высчитать теплоемкость образца и приращение энтропии по формулам и занести в таблицу:

$$Q = (W - W')\Delta t - C_0\Delta T, \quad \Delta S = \frac{Q}{T}$$

Таблица

ОБРАЗЕЦ 1. Нагрев				Охлаждение		ОБРАЗЕЦ 2. Нагрев				Охлаждение	
T, °C	t, мин	Q	ΔS	T, °C	t, мин	T, °C	t, мин	Q	ΔS	T, °C	t, мин
30				30		30				30	
40				40		40				40	
50				50		50				50	
60				60		60				60	
70				70		70				70	
80				80		80				80	
90				90		90				90	
92				92		92				92	
94				94		94				94	
96				96		96				96	
98				98		98				98	
100				100		100				100	
102				102		102				102	
104				104		104				104	
106				106		106				106	
108				108		108				108	
110				110		110				110	
112				112		112				112	
114				114		114				114	
116				116		116				116	
118				118		118				118	
120				120		120				120	

Контрольные вопросы:

1. Какую температуру называют температурой плавления органического вещества?
2. Какие выводы можно сделать, зная температуру плавления вещества? Почему при плавлении кристаллических тел их температура остается неизменной?
3. Какое состояние вещества называют «переохлажденной жидкостью»? При каких условиях оно возникает?
4. На кривой охлаждения, покажите участок кристаллизации. На кривой нагревания, покажите участок плавления.
5. Что такое термодинамическая энтропия?

Лабораторная работа № 11

Теплопроводность воздуха при постоянном давлении

Цель: Определение коэффициента теплопроводности воздуха при постоянном давлении.

Оборудование: Лабораторный комплекс ЛКТ-2, блок «Свойства газов», соединительные провода, разъём-заглушка, датчик температуры с разъёмом типа «тюльпан», встроенный в комплекс мультиметр.

Краткая теория.

Теплоемкость. Основные понятия.

Теплоёмкость тела — физическая величина, численно равная тепловой энергии (теплоте) ∂Q , подведенной к телу при изменении его температуры на 1К в термодинамическом процессе:
$$C = \frac{\partial Q}{dT} \quad (1)$$

Теплоемкость тела зависит от химического состава, массы тела и его термодинамического состояния, а также от вида термодинамического процесса изменения этого состояния. **Теплоемкость тела** является экстенсивным свойством вещества, т. к. *зависит от количества вещества в теле*. Поэтому вместо теплоемкости используют понятия удельной теплоемкости. Различают:

- удельную массовую теплоемкость c_x — это теплоемкость единицы массы вещества:

$$c_x = \frac{dC}{dm} \quad (2)$$

- а также молярную теплоемкость C_{mx} — это теплоемкость одного моля вещества:
$$C_{mx} = M \cdot c_x \quad (3)$$

Удельная теплоемкость зависит не только от строения вещества, но и от вида термодинамического процесса. Наиболее часто на практике используются теплоемкости изобарного ($P=\text{const}$) и изохорного ($V=\text{const}$) процессов. Эти теплоемкости называются изобарной c_p и изохорной c_v .

Теплоемкость газа при постоянном давлении и при постоянном объеме. Уравнение Майера.

Первый закон термодинамики в дифференциальной форме:

$$\partial Q = dU + \partial A \quad (4)$$

где $\partial Q = mc_x dT$ — элементарное количество теплоты, подводимой к термодинамической системе, затрачивается на увеличение ее внутренней энергии dU и на элементарную работу $\partial A = p dV$, совершаемую системой против внешних сил.

Теплота, внутренняя энергия и работа, приходящиеся на единицу массы вещества называются удельными. Рассмотрим два термодинамических процесса для m кг вещества:

2. Однородное вещество нагревается при постоянном объеме ($V=\text{const}$).

В этом случае $dV=0$ и работа $\partial A = p dV = 0$, следовательно, вся теплота ∂Q ,

подведенная к веществу, идет на увеличение его внутренней энергии dU :

$$\partial Q = dU \quad (5)$$

Т. к. величина dU является полным дифференциалом, то удельная изохорная теплоемкость равна: $c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$

2. Вещество нагревается при постоянном давлении ($P=\text{const}$).

В этом случае теплота, подводимая к веществу, идет не только на увеличение его внутренней энергии dU , но и на совершение работы ∂A против внешних сил: $\partial Q = dU + \partial A$ (6)

Следовательно, удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p больше удельной теплоемкости при постоянном объеме c_v .

Связь между удельными и молярными теплоемкостями идеального газа для этих процессов: $c_p - c_v = \frac{R}{M}$ (7)

Для молярных теплоемкостей идеального газа получим формулу Майера:

$$C_p - C_v = R \quad (8)$$

3. Адиабатным процессом называется такой термодинамический процесс, в котором к системе не подводится и от системы не отводится теплота:

$$dQ = 0$$

Первый закон термодинамики для адиабатного процесса для массы вещества 1 кг приобретает следующий вид:

$$dU = - PdV \quad (9)$$

Для любой массы вещества объемом V выполняется уравнение адиабаты или уравнение Пуассона, которое справедливо и для газа, и для жидкости, и для твердого тела: $PV^\gamma = \text{const}$ (10)

Реальные газы в области умеренных давлений по своим свойствам приближаются к идеальным газам, и для них можно применять соотношения для идеальных газов.

Для идеального газа показатель адиабаты с учетом соотношения:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v} \quad (11)$$

Теплоемкость жидких и твердых тел.

Поскольку частица твердого тела колеблется около положения равновесия, ее энергия складывается из кинетической энергии теплового движения и потенциальной энергии смещения от положения равновесия. В среднем при достаточно высокой температуре эти энергии можно считать одинаковыми. Поэтому в среднем полная энергия одной частицы:

$$W = W_k + W_{\text{п}} = 2W_k$$

Поскольку $W_k = \frac{ikT}{2}$, получим: $W_k = ikT$, где i – число степеней свободы частицы, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Так как частица может колебаться в любом направлении, ее число степеней свободы будет равно 3, тогда: $W = 3kT$.

В одном моле химически простого вещества содержится N_A частиц, N_A – постоянная Авогадро. Поэтому внутренняя энергия моля:

$$U_M = WN_A = 3kTN_A = 3RT$$

Молярная теплоемкость C равна внутренней энергии моля, отнесенной к его температуре, т.е. $C = \frac{U_M}{T} = 3R$, $R = 8,31$ Дж/(К·моль), получим $C = 25$ Дж/(К·моль).

Следовательно, атомная теплоемкость всех химически простых кристаллических твердых тел при достаточно высокой температуре равна 25 Дж/(К·моль).

В случае твердых химических соединений число частиц в моле будет уже не N_A , а pN_A , где p – число атомов в молекуле. Поэтому молярная теплоемкость химического соединения выразится формулой $C = 25p$ Дж/(К·моль).

Следовательно, молярная теплоемкость твердого химического соединения, равна сумме атомных теплоемкостей, входящих в него элементов.

Теплоемкость воздуха. Особенности

Воздух представляет собой газовую смесь. При их рассмотрении в термодинамике приняты следующие допущения. Каждый газ в составе смеси должен быть равномерно распределен по всему объему. Таким образом, объем газа равен объему всей смеси. Каждый газ в составе смеси обладает своим парциальным давлением, которое он оказывает на стенки сосуда. Каждый из компонентов газовой смеси должен иметь температуру, равную температуре всей смеси. При этом сумма парциальных давлений всех компонентов равняется давлению смеси. Расчет теплоемкости воздуха выполняется на основе данных о составе газовой смеси и теплоемкости отдельных компонентов. Теплоемкость неоднозначно характеризует вещество. Из первого закона термодинамики можно сделать вывод, что внутренняя энергия тела изменяется не только в зависимости от количества полученного тепла, но и от совершенной телом работы. При различных условиях протекания процесса теплопередачи, работа тела может различаться. Таким образом, одинаковое сообщенное телу количество теплоты, может вызвать различные по значению изменения температуры и внутренней энергии тела. Эта особенность характерна только для газообразных веществ. ***В отличие от твердых и жидких тел, газообразные вещества, могут сильно изменять объем и совершать работу.*** Именно поэтому теплоемкость воздуха определяет характер самого термодинамического процесса. Однако при постоянном объеме воздух не совершает работу. Поэтому

изменение внутренней энергии пропорционально изменению его температуры. Отношение теплоемкости в процессе с постоянным давлением, к теплоемкости в процессе с постоянным объемом для адиабатного процесса равно:

$$\gamma = 1 + \frac{R}{C_V}$$

Описание установки

Ознакомьтесь с устройством и схемой соединения модуля «Теплопроводность газов»

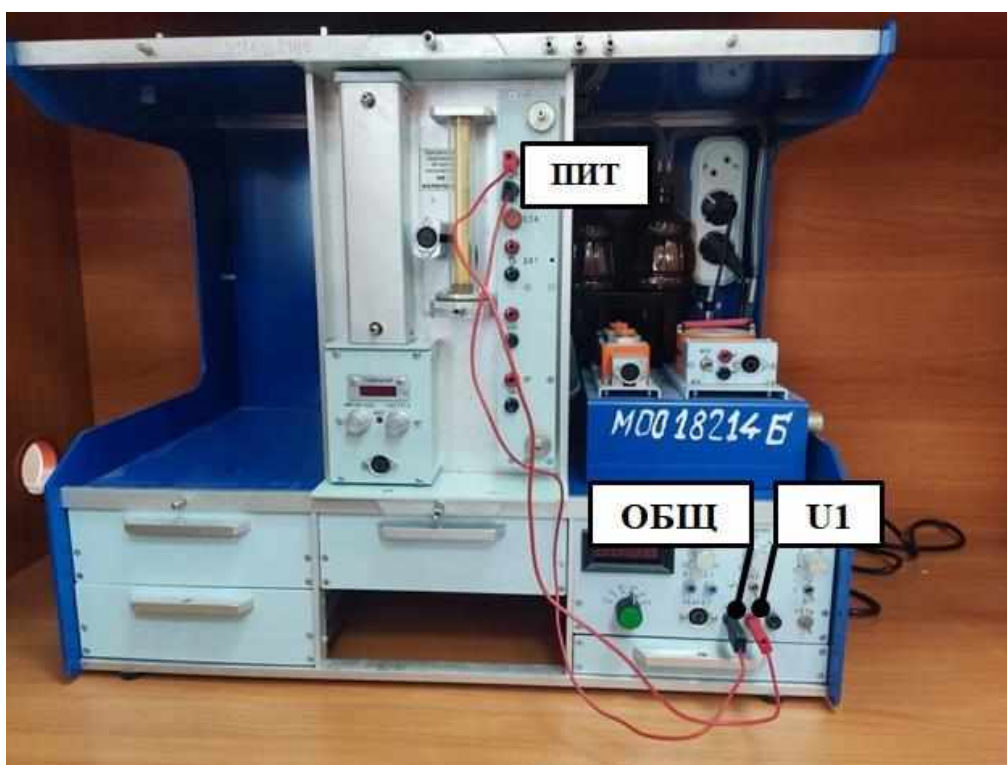


Рисунок 1 – Блок «Свойства газов»

Ход работы

1. Установите блок «Свойства газов» в рабочей зоне каркаса, как показано на рисунок 1, и закрепите его с помощью крепёжных гаек.
2. Согласно схеме, приведенной на рисунке 2 а, 2 б), подключите модуль 06 (гнезда «ПИТ») к источнику питания (гнезда «U1» и «ОБЩ» на передней панели ИСТ-4К).
3. Датчик температуры корпуса модуля подключите к входу «Д1» ИСТ-4К кабелем с разъёмом типа «Тюльпан» и к панели блока «Теплопроводность газов» к разъёмам «ДАТ» (рисунок 3).
4. Вход датчика «Д2» ИСТ-4К замкните разъёмом-заглушкой.

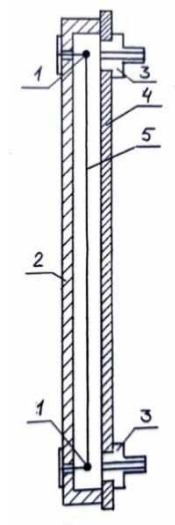


Рисунок 2 а – Модуль 06
«Теплопроводность газов»

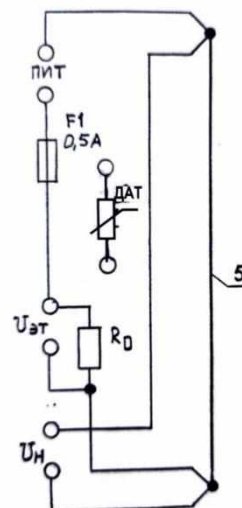


Рисунок 2 б – Схема соединения
модуля 06 «Теплопроводность газов»

- 1 – Стойки для натяжения металлической нити.
- 2 – Корпус блока.
- 3 – Пробка со штуцером.
- 4 – Панель модуля «Теплопроводность газов».
- 5 – Металлическая нить (Сплав на основе никеля) внутри цилиндрического канала

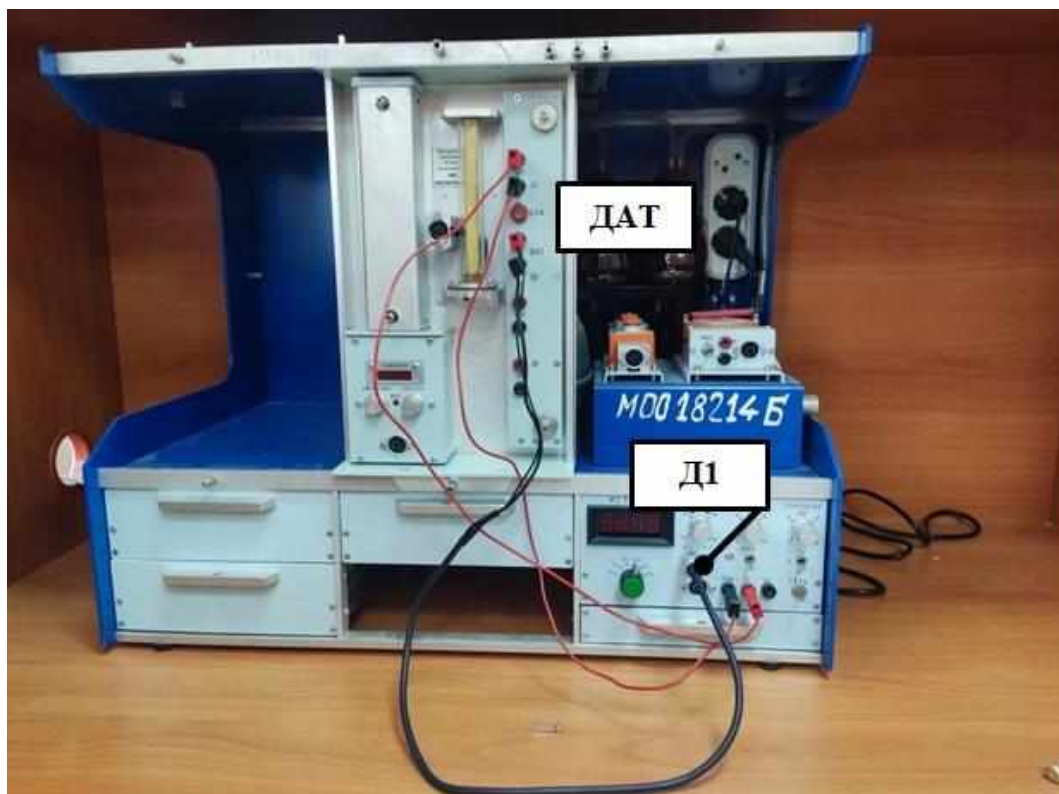


Рисунок 3 – Подключение датчика температуры

5. Подключите гнезда «Ун» на панели блока «Теплопроводность газов» к гнездам мультиметра «Мульт» (рисунок 4).

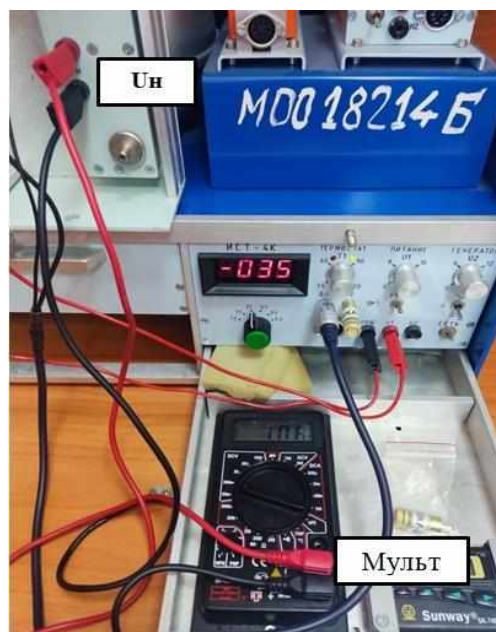
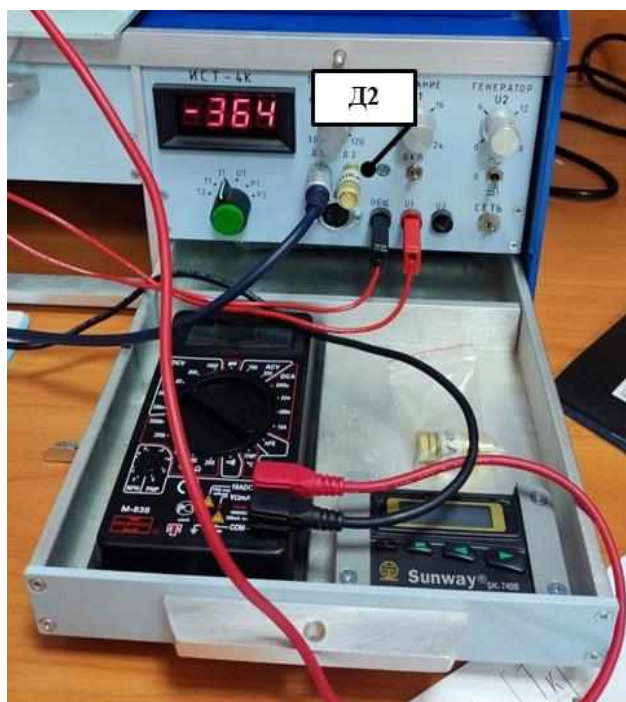


Рисунок 4 – Подключение мультиметра к блоку «Теплопроводность газов»

6. Включите комплекс ЛКТ-2 в сеть (рисунок 5), выставите регулятор термостат «Т1» в положение **60**; регулятор питания «U1» в **0**; регулятор генератор «U2» в положение **0**; регулятор выбора измеряемой величины «И» в положение **I1**; тумблер, отвечающий за тип тока «ТОК», в положение **0**. Переведите тумблер «СЕТЬ» в верхнее положение, затем тумблер «ВКЛ» в верхнее положение. Экран панели модуля ИСТ-4К начнёт показывать силу тока в мА. Довести значение силы тока приблизительно до **30 мА**, с помощью регулятора «U1», поворачивая его по ходу часовой стрелки.

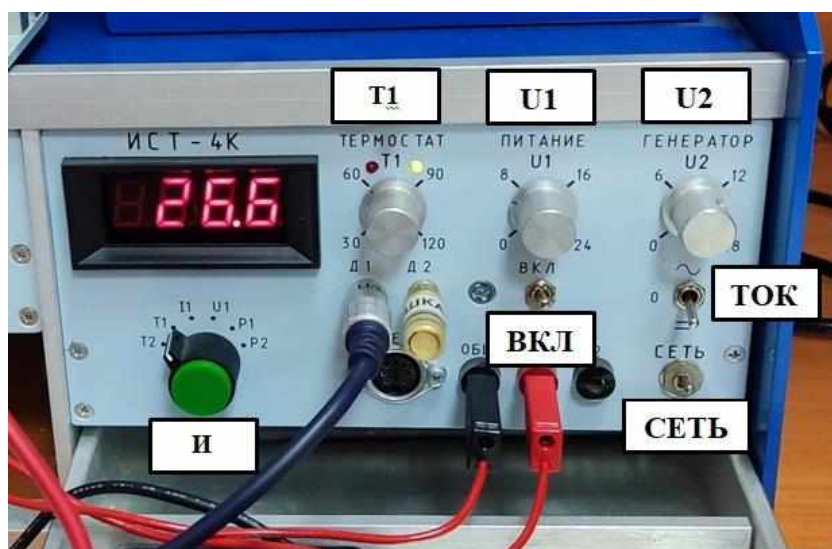


Рисунок 5 – Включение комплекса ЛКТ-2 в сеть

7. Мультиметром измеряйте напряжение U_H на нити (гнезда « U_H ») и напряжение $U_{эт}$ на эталонном резисторе R_0 (гнезда « $U_{эт}$ »). Пределы измерений мультиметра выбирайте так, чтобы показания имели не менее 3 значащих цифры. Снимите показания T_k , град с помощью регулятора выбора измеряемой величины «И»
8. Повышайте силу тока до следующих величин: $\approx 120, 200, 250, 300, 350, 400$. Снимайте показания: напряжения мультиметром с гнезд U_H и $U_{эт}$, а также температуру T_k , град для каждой величины силы тока.
9. Опустите тумблеры «Сеть» и «ВКЛ» вниз; регулятор питания « U_1 » в положение 0.
10. Диаметр Нити $d=0,10$ мм, а эффективный диаметр канала $D=12$ мм, длина нити $L=240$ мм, сопротивление нити $R=2,5 \dots 3,5$ Ом, температурный коэффициент сопротивления нити (при 0°C) $\alpha=5,6 \cdot 10^{-3}$ 1/град, сопротивление эталонного резистора $R_0=10,0$ Ом (см. рисунок 13) (Проверьте!). Рекомендуемый диапазон токов для измерения сопротивления нити при комнатной температуре: 30-50 мА, для измерения теплопроводности 150-400 мА для измерения теплопроводности. Максимальный ток в нити 0,5 А.

Ток в нити: $I = \frac{U_0}{R_0}$, сопротивление нити: $R=R_0 \frac{U_H}{U_{эт}}$, мощность нагревания нити: $W=I^2 R$.

Зависимость сопротивления от температуры $R=R'(1+\alpha T)$, где R' – сопротивление при 0°C .

Измерив сопротивление R_1 нити при начальной (комнатной температуре T_1 и сопротивление R при искомой температуре T , находим температуру нити:

$$T = T_1 + (R - R_1) \left(\frac{1 + \alpha T_1}{\alpha R_1} \right)$$

Теплопроводность воздуха « k » определяют по установившейся разности температуры T нити и температуры T_k корпуса модуля:

$$k = W \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi(T - T_k)L}$$

Данные заносим в таблицу.

Таблица

№	$U_H, \text{В}$	$U_{эт}, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$R, \text{Ом}$	$W, \text{Вт}$	$T, \text{град}$	$T_k, \text{град}$	$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1				$R_1 =$		$T_1 =$		
2								
3								
4								
5								
6								
7								

В верхней строке таблицы приведено измерение сопротивления R_1 с помощью малого тока при комнатной температуре $T_1 = T_k$

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение теплоемкости. Назовите виды теплоемкости.
2. Теплоемкость при постоянном объеме. Теплоемкость при постоянном давлении.
3. Адиабатный процесс. Уравнение Пуассона.
4. Теплоемкость жидких и твердых тел.
5. Теплоемкость воздуха. Особенности.

Лабораторная работа №12

Описание лабораторного комплекса «Электричество и магнетизм» ЭИМ-Р

Комплекс состоит из блока генераторов напряжений, наборного поля, блока моделирования полей, измерительного блока, ПЭВМ, набора миниблоков, слабо проводящей пластины с электродами.

Блок генераторов напряжения

Общий вид блока генераторов напряжений показан на рисунке 1. Блок состоит из генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений (регулируемый источник постоянного напряжения и два нерегулируемых источника стабилизированного постоянного напряжения).



1. индикатор перегрузки генератора сигналов специальной формы;
2. индикатор перегрузки регулируемого источника постоянного напряжения «0...+15 В»;
3. индикатор перегрузки стабилизированного напряжения «+15В»;
4. индикаторы перегрузки стабилизированного напряжения «-15 В»;
5. индикатор частоты;
6. индикатор выбранной формы сигнала;
7. выход синхронизации осциллографа (прямоугольные импульсы «+5 В»);
8. кнопки переключения формы сигнала: синусоидальная; биполярные импульсы «-15 В...+15 В»; унисполярные импульсы «0...+15В»;

Рисунок 1 – Блок генераторов напряжений

9. выходной сигнал генератора сигналов специальной формы;
10. кнопки регулировки амплитуды сигнала генератора сигналов специальной формы;
11. кнопки регулировки частоты от 50 Гц до 20000 Гц;
12. регулируемое постоянное напряжение «0... +15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
13. нулевой выход (земля);
14. кнопки установки постоянного напряжения,

15. индикатор постоянного напряжения на выходе регулируемого источника «0... +15 В»
16. стабилизированное напряжение «+15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
17. нулевой выход (земля);
18. стабилизированное напряжение «—15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
19. кнопка исходной установки блока генераторов: выходной сигнал источника постоянного напряжения (12) — 0 В; выходной сигнал генератора сигналов специальной формы — синусоидальный, частота 500 Гц, амплитуда выходного сигнала (9) 0 В;
20. выключатель питания («сеть»).

Генератор сигналов специальной формы (ГССФ)

Генератор (рисунок 1) предназначен для получения сигнала частотой от 0,05 до 20 кГц различной формы и амплитуды. Генератор может выдавать три вида сигнала: синусоидальный (амплитуда —15...+15 В), биполярные импульсы (амплитуда —15...+15 В, ширина импульса равна половине периода), униполярные импульсы (0...+15 В, ширина импульса равна половине периода). Установку формы сигнала осуществляют кнопками 8. Частоту выходного сигнала (выход 9) регулируют кнопками 11, а амплитуду — кнопками 10. Значение частоты сигнала отображается на индикаторе 5. Для получения стабильного изображения сигнала на осциллографе в генераторе предусмотрены импульсы синхронизации (прямоугольные, заданной частоты, амплитудой +5 В, ширина импульса равна половине периода), которые можно снимать с выхода 7.

Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки

В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

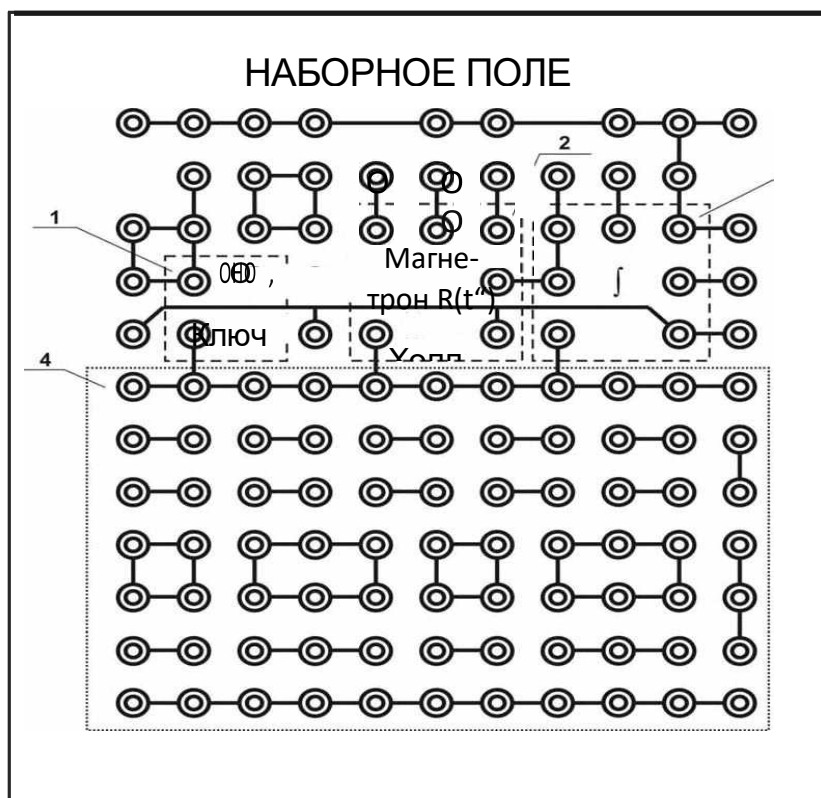
Источники постоянного напряжения (ИПН)

Источники постоянного напряжения (рисунок 1) предназначены для получения стабилизированного постоянного напряжения —15 В, +15 В (необходимо для работы интегратора тока, вакуумной лампы и датчика Холла), и регулируемого постоянного напряжения 0...+15 В, которое регулируют кнопками 14.

Источники имеют защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 2, 3, 4. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

Блок «Наборное поле»

Наборное поле (рисунок 2) предназначено для сборки электрических схем. Линии на наборном поле показывают физически соединенные гнезда.

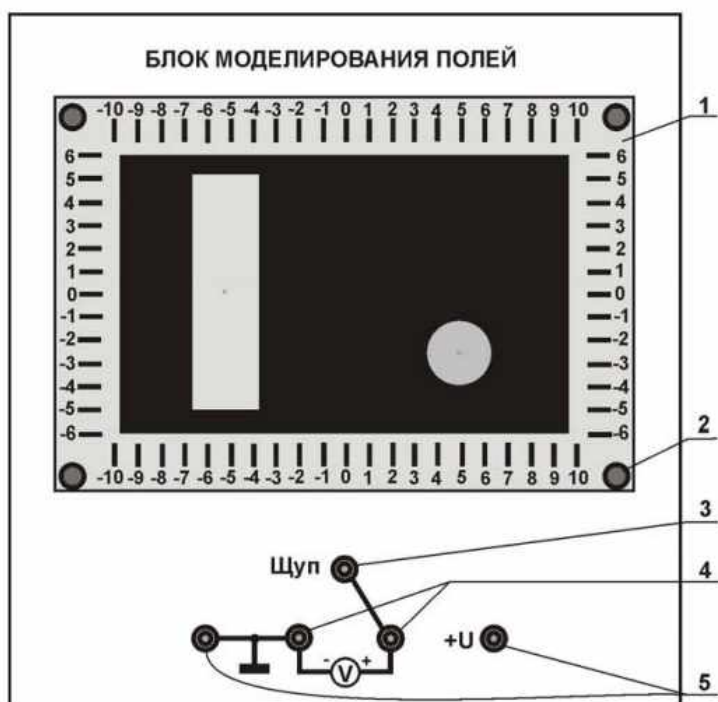


1. место для подключения миниблока «Ключ»;
2. место для подключения миниблоков «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Эффект Холла», «Ферромагнетик», «Магнетрон»;
3. место для подключения миниблока «Интегратор тока»;
4. поле для подключения миниблоков.

Рисунок 2 – Наборное поле

Блок «Моделирования полей»

Блок моделирования полей (рисунок 3) предназначен для исследования моделей электростатических полей, создаваемых электрическими токами в слабопроводящих средах.



1. слабопроводящая пластина;
2. крепление пластины;
3. вход для подключения зонда (щупа);
4. входы для подключения вольтметра;
5. входы для подключения регулируемого источника постоянного напряжения

Рисунок 3 – Моделирование полей

Измерительный блок

Измерительный блок предназначен для измерения и передачи значений измеряемых токов и напряжений по USB на ПЭВМ под управлением программы «Приборы ЭиМ». Общий вид лицевой панели блока показан на рисунке 4.

Блок содержит делители напряжений для ввода напряжений, шунты для ввода токов, гальванически развязанные входные цепи измеряемых сигналов, разъем для подключения термопары и усилитель термо-ЭДС, разъем USB для подключения к компьютеру.

Изображенные на лицевой панели блока виртуальные измерительные приборы «Вольтметр 1» (V1), «Вольтметр 2» (V2), «Амперметр 1» (A1) и «Амперметр 2» (A2) включаются в цепь как обычные вольтметры и амперметры.

Кнопки переключения делителей напряжения и шунтов предназначены для выбора пределов измерения. О выбранном диапазоне сигнализирует подсветка соответствующей кнопки на измерительном блоке

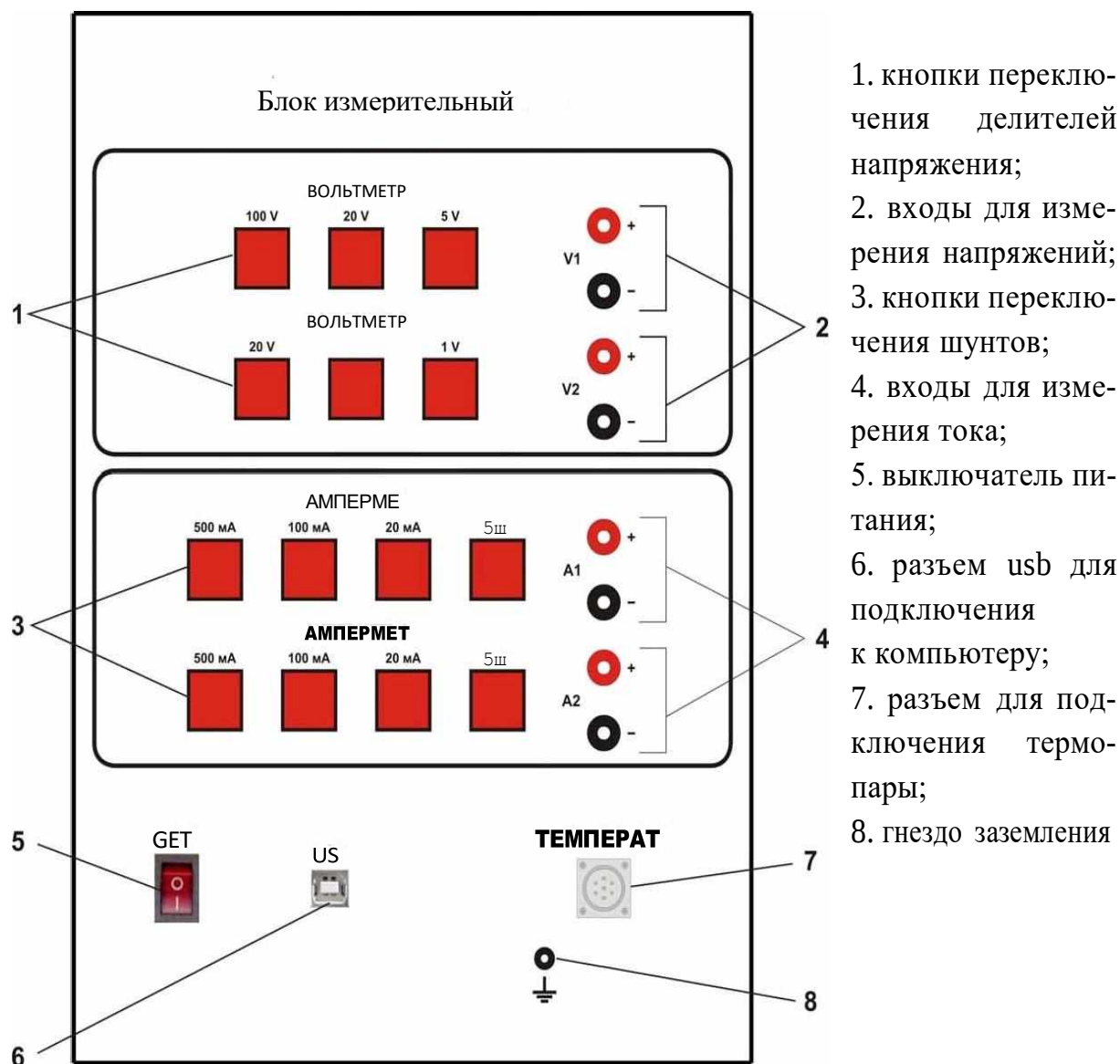


Рисунок 4 – Общий вид лицевой панели блока

Набор виртуальных приборов

Программное обеспечение комплекса устанавливается на ПЭВМ с CD-диска из комплекта поставки. Ярлык установленного ПО «Приборы ЭИМ» необходимо разместить на рабочем столе.

Программное обеспечение представляет собой набор виртуальных приборов, подключаемых к лабораторной установке с помощью измерительного блока.

Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами.

1. Соберите цепь согласно схеме опыта, включив в нее вместо реальных амперметров и вольтметров виртуальные приборы, изображенные на лицевой панели измерительного блока.
2. Включите виртуальные приборы двойным щелчком левой кнопки мыши на ярлыке «Приборы ЭИМ». Откроется блок «Приборы I» (рисунок 5), в котором содержатся вольтметры и амперметры. Часть из них активизирована по умолчанию (т.е. включены пределы измерения).
3. Расположение приборов в окне этого блока можно изменить, щелкнув левой кнопкой мыши на обозначение прибора и выбрав в открывшемся перечне нужный прибор для одновременного изменения, например, действующего, амплитудного, среднего и др. значений одного и того же напряжения (тока).
4. Активизируйте нужные виртуальные приборы, щелкнув в соответствующих окнах на кнопках «Откл». Для отключения прибора щелкните в окне предела измерения. Чем больше каналов задействовано в виртуальных измерениях тока и напряжения, тем ниже частота сканирования и меньше значений вводится в компьютер за период измерения. Период измерения, в течении которого производится ввод данных в компьютер, по умолчанию равен 0,1с. Его можно изменить, открыв меню, как показано на рисунке 5 и выбрав мышью строку «Период измерения»
5. Выберите род измеряемой величины, щелкнув в окне «Действующее» и выбрав из открывающегося списка нужное значение. В этом окне опция «Действ. перем.» означает действующее значение сигнала,
6. Выберите пределы измерения амперметров и вольтметров, начав соответствующие кнопки на блоке измерения (рисунок 4). Выбранные пределы отображаются автоматически в соответствующих окнах виртуальных приборов. Когда измеряемый сигнал превышает допустимый для данного канала уровень, окно с показанием виртуального прибора начинает мигать красным цветом, а в верхней части панели включается надпись «Перейдите на больший предел». Она гаснет, как только предел измерения становится

больше измеряемой величины.

7. Для того, чтобы закрыть окно виртуальных приборов, необходимо щелкнуть по клавише «Выкл.».

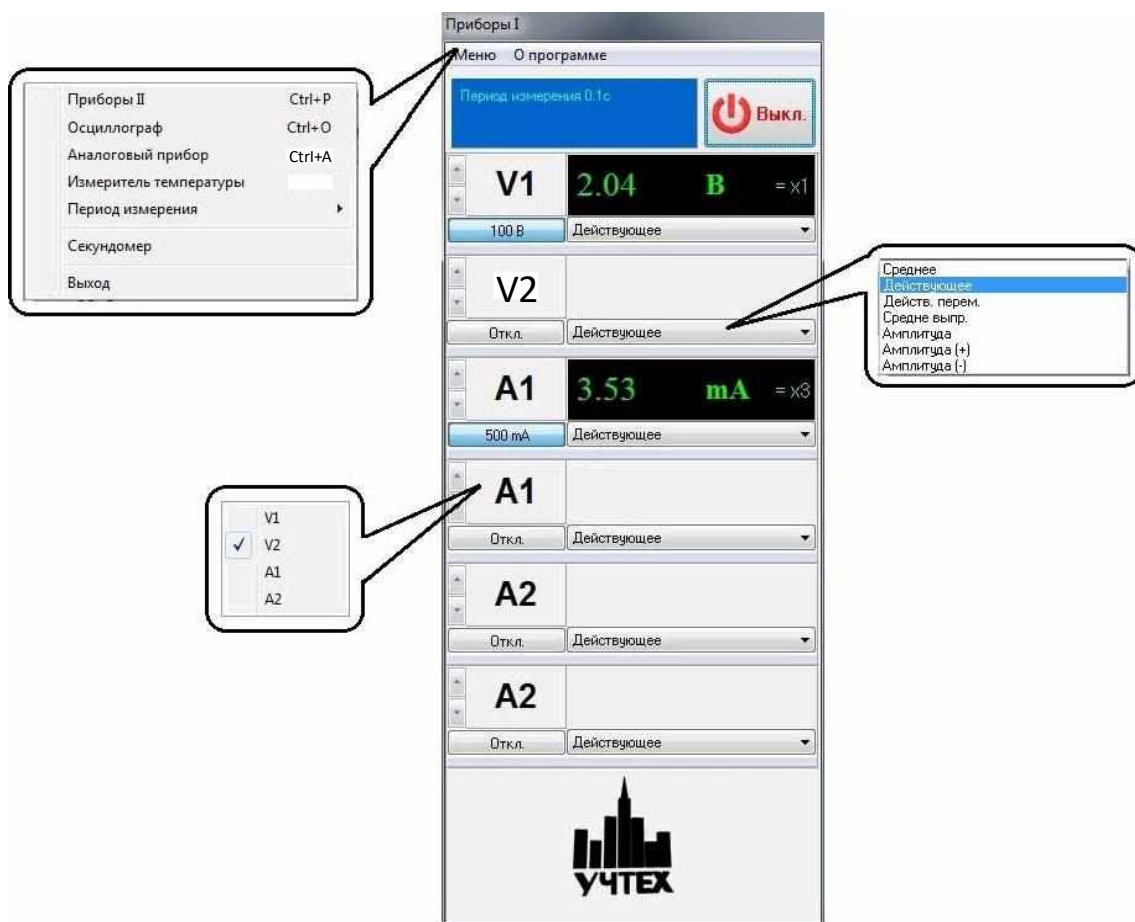


Рисунок 5 – Окно «Приборы I»

Виртуальный псевдоаналоговый прибор

Для наблюдения тенденции изменения измеряемой величины более удобным является стрелочный прибор. Виртуальный псевдоаналоговый стрелочный прибор (рисунок 6) может дублировать показания любого из рассмотренных выше цифровых приборов. Он открывается щелчком мыши на строке «Аналоговый прибор» в меню блока «Приборы I» и подключается к любому из восьми приборов $x_1 \dots x_8$. На нем имеется также окно выбора типа шкалы и клавиша «Инерционный - Безинерционный», с помощью которой — можно замедлить или ускорить движение стрелки. Шкала зависит от выбранного диапазона исследуемого прибора. Показания стрелки дублируются в цифровом виде в специальном окне прибора.

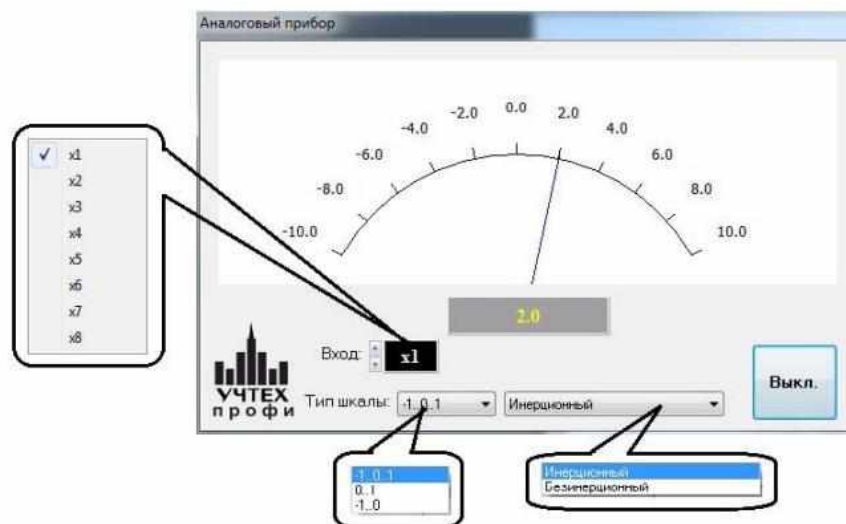
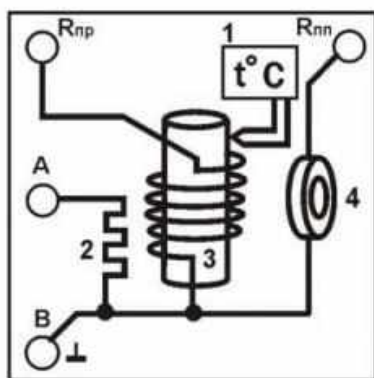


Рисунок 6 – Окно «Аналоговый прибор»

Набор миниблоков

1. Миниблок «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника» показан на рисунке 7. Проводник 3 и полупроводник 4 помещены в электрическую печь. При установке блока на место 2 наборного поля (см. рисунок 2) к выводу В нагревателя печи необходимо подключить нулевой выход 13 (см. рисунок 1). Вывод А необходимо подключить к регулируемому источнику постоянного напряжения 0...+15 В выход 12 (см. рисунок 1). Внутри печи введена термопара 1, сигнал с которой подается на клеммы разъема в верхней части миниблока, который соединяют специальным кабелем с мультиметром или разъемом «Температура» измерительного блока (рисунок 8).



1. термопара с разъемом для подключения к измерительному блоку;
 2. нагреватель печи;
 3. проводник;
 4. полупроводник;
- Rпр – вывод проводника, Rпп — вывод полупроводника

Рисунок 7 – Миниблок «Исследование температурной зависимости»

2. Миниблок «Ключ» (рисунок 8) предназначен для замыкания электрических цепей и переключения элементов электрической цепи. Переключение осуществляют с помощью тумблера. В положении А соединены выходы С и D, в положении В соединены выходы Е и D.

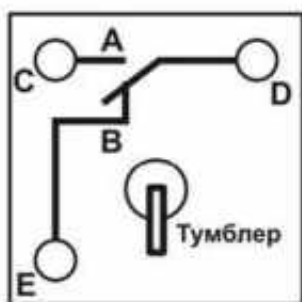


Рисунок 8 – Миниблок «Ключ»

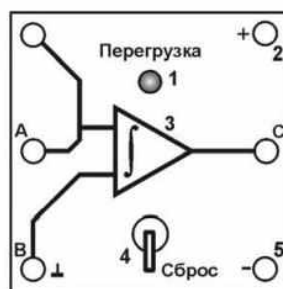


Рисунок 9 – Миниблок «Индикатор тока»

3. Миниблок «Интегратор тока» (рисунок 9) предназначен для измерения заряда, протекающего в цепи (входы А, В интегрирование по току), и преобразования его в сигнал (выход С), измеряемый мультиметром $U_{инт} - Q$). В случае, если накопленный заряд превышает допустимый уровень, загорается индикатор 1 «Перегрузка». Для сброса заряда, накопленного интегратором, необходимо тумблер 4 перевести в положение «Сброс». Интегратор тока устанавливают на место 3 наборного поля (см. рисунок 2). Питание интегратора осуществляется от источника стабилизированных постоянных напряжений: вход 2 необходимо подключить к «315 В» (выход 16, см. рисунок 1), а вход 5 к «—15 В» (выход 18, см. рисунок 1), вход В необходимо подключить к земле (выход 17, см. рисунок 1).
4. Миниблок «Конденсатор» (рисунок 10) содержит конденсатор емкостью C , указанной на блоке, или неизвестной емкостью C_x .
5. Миниблок «Сопротивление» (рисунок 11) содержит сопротивление R (значение указано на блоке).

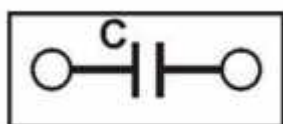


Рисунок 10 – Миниблок «Конденсатор»

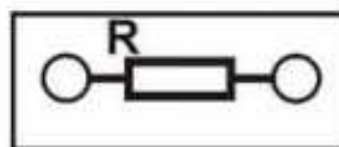


Рисунок 11 – Миниблок «Сопротивление»

Контрольные вопросы

1. Из каких частей состоит лабораторный комплекс «Электричество и магнетизм»? Для чего предназначены блоки «Наборное поле», «Моделирование полей», «Измерительный блок»?
2. Сигналы какой формы может вырабатывать генератор напряжений специальной формы? Как изменить форму сигнала?
3. Расскажите о блоке генераторов напряжения. Как определить, что генератор напряжений перегружен? Что нужно сделать при наличии перегрузки?
4. Расскажите о наборе виртуальных приборов. Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами.
5. Расскажите о наборе миниблоков в данной установке.

Лабораторная работа № 13

Определение емкости конденсатора

Цель: ознакомиться с методами измерения электрической емкости конденсатора.

Оборудование: лабораторный комплекс «Электричество и магнетизм», генератор напряжений, измерительный блок, предназначенный для измерения и передачи значений измеряемых токов и напряжений по USB на ПЭВМ под управлением программы «Приборы ЭИМ», миниблоки «Интегратор тока», «Ключ», «Конденсатор» эталонной емкости, «Конденсатор» неизвестной емкости.

Краткая теория

Скалярная величина C – емкость, равная абсолютному значению отношения электрического заряда одного проводника к разности электрических потенциалов двух проводников при условии, что эти проводники имеют одинаковые по модулю, но противоположные по знаку заряды и что все другие проводники бесконечно удалены, называется *электрической емкостью* или просто его *емкостью*.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (1)$$

Для получения определенной емкости удобно взять два проводника, расположить их как можно ближе к друг другу, а между ними поместить диэлектрик. Электризовать эти проводники следует разноименно, так как взаимное притяжение зарядов на проводниках будет способствовать накоплению больших зарядов. Диэлектрик между проводниками играет двоякую роль: во-первых, он увеличивает емкость и, во-вторых, не дает зарядам нейтрализоваться, т.е. перескочить с одного проводника на другой. Поэтому его электрическая проницаемость и электрическая прочность (на пробой) должны быть достаточно большими.

Емкость конденсатора является его основной характеристикой и зависит от его размеров, формы и от свойств среды, находящейся между его обкладками.

Пусть C_0 – емкость любого конденсатора, когда его обкладки находятся в вакууме. Практически мы получим ту же емкость, если между обкладками будет атмосферный воздух. Пусть далее C – емкость того же конденсатора, если все пространство между его обкладками заполнено каким-либо другим однородным диэлектриком. Отношение $C/C_0 = \varepsilon$ называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью* диэлектрика.

Емкость конденсаторов простой формы можно вычислить. Для этого предполагают, что на каждой из обкладок находится некоторый заряд q , и вычисляют потенциал в электрическом поле рассматриваемого конденсатора $U(x, y, z)$. Если удастся решить эту задачу, то отсюда получается и значение

напряжения между обкладками конденсатора U . После этого емкость можно найти по формуле (1).

Рассмотрим, как определить емкость плоского конденсатора.

Плоский конденсатор. Плоский конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на близком расстоянии d одна от другой. Заряды пластин $+q$ и $-q$. Если линейные размеры пластин велики по сравнению с d , то электростатическое поле между пластинами можно считать таким же, как поле между двумя плоскостями, заряженными разноименно с поверхностными плотностями зарядов $\sigma = q/S$, $(+\sigma$ и $-\sigma)$. Направим ось перпендикулярно плоскости. Напряженность поля конденсатора между пластинами:

$$E_x = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (0 \leq x \leq d),$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей конденсатор. Из связи:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -E_x$$

получаем, что

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

тогда разность потенциалов равна:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \int_0^d dx = -\frac{\sigma d}{\varepsilon\varepsilon_0} = -\frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S}$$

Таким образом, электрическая емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

Если напряжение на конденсаторе сделать слишком большим, то конденсатор «пробивается», т. е. между его обкладками возникает искра (внутри диэлектрика или по его поверхности) и конденсатор портится вследствие нарушения изоляции. Поэтому каждый конденсатор характеризуется не только своей емкостью, но еще и *максимальным рабочим напряжением*. Для того чтобы, располагая определенными конденсаторами, осуществить желаемую емкость при нужном рабочем напряжении, конденсаторы соединяют в батареи (рисунки 1).

На 1, а показано **параллельное соединение плоских конденсаторов**. В этом случае общим для всех конденсаторов является напряжение U , и, можно определить: $q_1 = C_1 U$, $q_2 = C_2 U$, ...

Суммарный заряд, находящийся на батарее, равен

$$Q = \sum q_i = U \sum C_i,$$

и поэтому емкость батареи:

$$C = q/U = \sum C_i \quad (2)$$

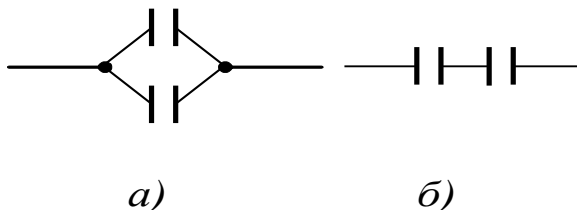


Рисунок 1 – Соединение конденсаторов

Емкость батареи конденсаторов, соединенных параллельно, равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. Так как в этом случае напряжение на каждом конденсаторе равно напряжению на батарее, то и допустимое рабочее напряжение батареи будет таким же, как и у одного конденсатора.

Пробивное напряжение такой батареи равно пробивному напряжению того из конденсаторов в батарее, у которого оно наименьшее.

На рисунке 1б изображено **последовательное соединение плоских конденсаторов**. В этом случае одинаков для всех конденсаторов заряд q , равный полному заряду батареи, и, можно определить

$$U_1 = q/C_1, \quad U_2 = q/C_2$$

Напряжение же батареи будет равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах, т. е.

$$U = \sum U_i = q \sum \frac{1}{C_i}$$

Поэтому для емкости C всей батареи, находим

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i} . \quad (3)$$

При последовательном соединении конденсаторов суммируются обратные значения емкостей. В этом случае напряжение на каждом конденсаторе будет меньше напряжения на батарее, и поэтому допустимое значение напряжения больше, чем у одного конденсатора, чем уменьшается возможность пробоя конденсаторов.

Ход работы:

1. Соберите электрическую цепь по схеме, приведенной на рисунке 1а и 1 б в соответствии с номиналом, (рисунок 2 а и 2 б и рисунок 3), подключив конденсаторы C_3 и C_x , параллельно. Значения эталонной емкости C_3 , запишите в таблицу 1.

2. Значение C_x и параллельно соединенных конденсаторов C_3 и C_x , определите (рисунок 2). Измерьте емкость конденсаторов с помощью мультиметров. Для этого:
 - а) найдите в комплекте к мультиметру специальный переходник с «крокодилами» для подключения к гнезду 6 и измерению емкости (рисунок 2 а и 2 б).
 - б) подключите конденсатор при помощи крокодилов к переходнику и установите режим работы мультиметра в область 3 и номинал $2\mu F$ (рисунок 2 а и 2 б).
 - с) измерьте емкость конденсаторов при параллельном и последовательном соединениях, а также по отдельности (рисунок 4). Все значения занесите в таблицу 1 и таблицу 2.



Рисунок 2 – Измерение емкости конденсаторов



Рисунок 2 б – Специальный переходник с «крокодилами»

3. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.
4. Подключите выводы мультиметров на наборном поле (рисунок 3 а и 3б) к измерительному блоку (рисунок 3 б), соблюдая полярность $\equiv$ блоку генераторов. Регулируя центральный переключатель установите режим работы мультиметра V_1 и V_2 20V.
5. Подключите компьютер к сети. Зная порядок работы с виртуальными вольтметрами, установите в Окне «Приборы1» V_1 и V_2 (рисунок 4).
6. Включите кнопкой «Сеть» питание блока генераторов напряжения нажмите кнопку «Исходная установка». Включите питание кнопкой «Сеть» блока мультиметров (рисунок 3 а и 3 б).
7. **Зарядите конденсаторы**, для этого:
 - а) демпфирующий ключ 5 установите в положение «Сброс»;
 - б) переключатель (тумблер) установите в положение «А»;

в) изменяя напряжение зарядки конденсатора кнопками А и Б на блоке генераторов напряжений (рисунок 3 б) установите его не более 2В (измерения производятся по мультиметру V_1) не компьютере;

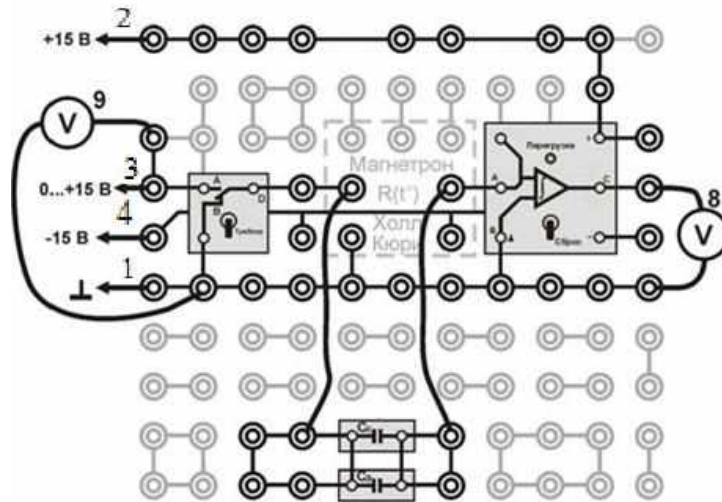


Рисунок 3а – Схема электрической цепи

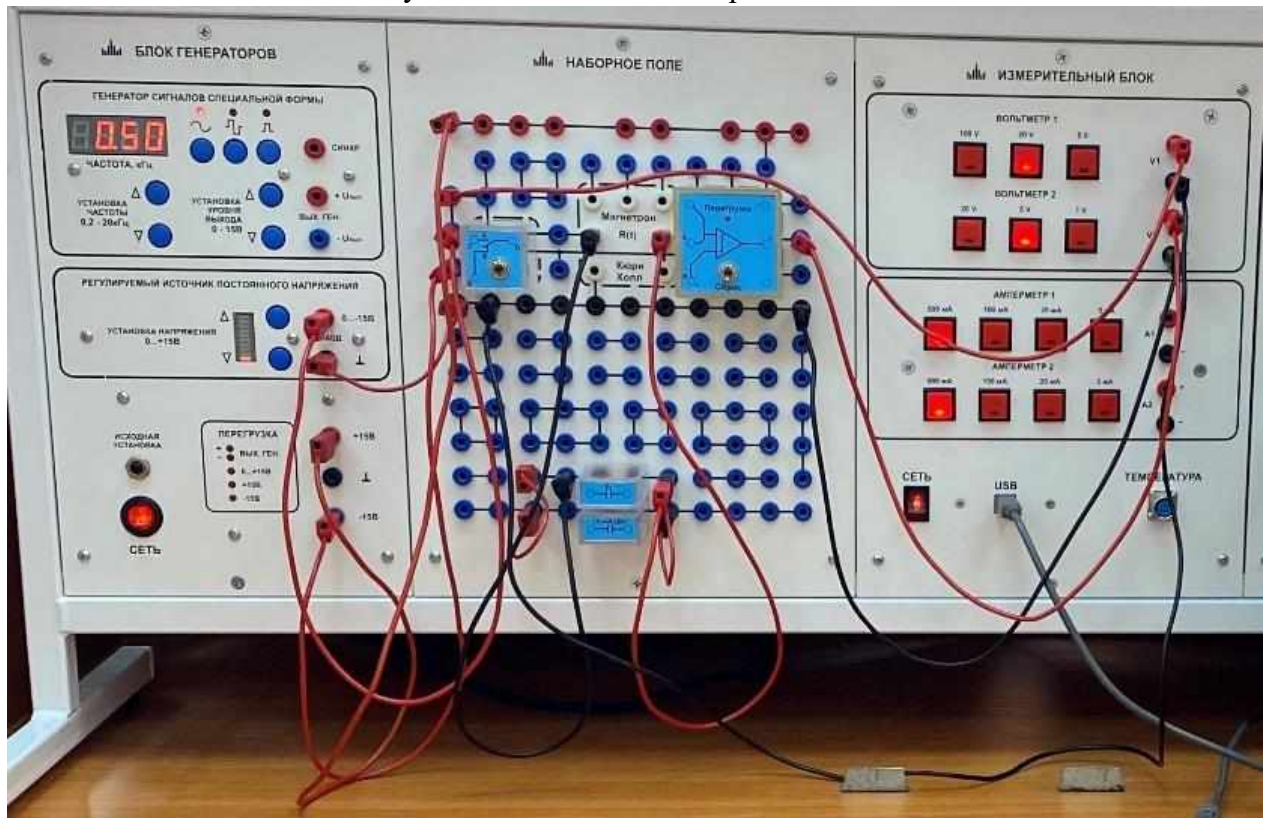


Рисунок 3б – Схема электрической цепи

8. **Разрядите заряженные конденсаторы через интегратор**, для этого:
 - а) разомкните демпфирующий ключ 5;
 - б) переведите переключатель в положение «В». Если при этом загорится индикатор перегрузки у интегратора тока, уменьшите напряжение зарядки конденсаторов. Запомните показания мультиметра V_2 непосредственно после разряда конденсатора.

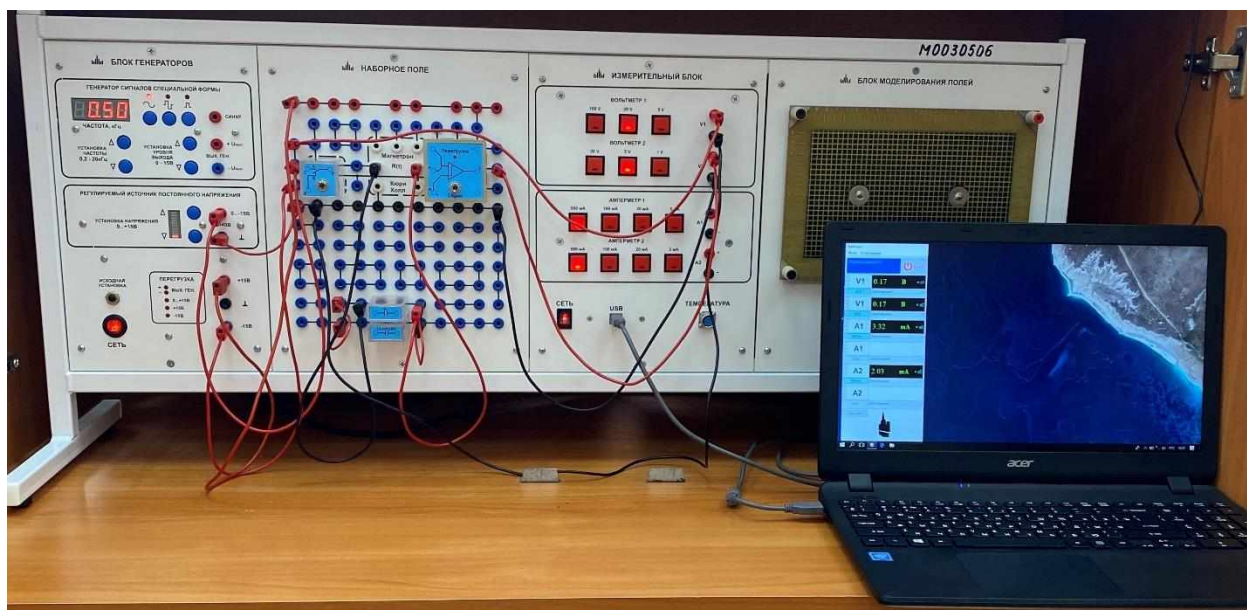


Рисунок 4 – Общий вид установки

9. Повторите пункты 7 и 8 несколько раз подобрав такое напряжение зарядки (показания мультиметра V_1) $U_{\text{парал}}$, при котором напряжение разрядки (показания мультиметра V_2) $U_{\text{инт}}^{\text{парал}}$ составили 8-10В (величина, пропорциональная заряду конденсатора). Запишите это напряжение в таблицу 1 и далее в ходе лабораторной работы **не изменяйте его**.
10. Не меняя напряжение зарядки $U_{\text{парал}}$, выполните 5 измерений $U_{\text{инт}}^{\text{парал}}$ и запишите результаты в таблицу 1.
11. Проведите отдельно измерения величины разрядки $U_{\text{инт}}^{\text{э}}$ (только эталонный конденсатор); $U_{\text{инт}}^{\text{х}}$ (только конденсатор неизвестной емкости); $U_{\text{инт}}^{\text{посл}}$ (последовательное подключение конденсаторов), $U_{\text{инт}}$ - напряжение разрядки на мультиметре V_2 . **Напряжение зарядки остается равным первоначальному и не меняется в ходе выполнения лабораторной работы!**

Таблица №1

№	Эталонный конденсатор $C_{\text{э}} = 1\text{мкФ}$	Неизвестный конденсатор $C_{\text{х}} =$	Соединение конденсаторов	
			Параллельное	Последовательное
	$U_{\text{инт}}^{\text{э}} =$	$U_{\text{инт}}^{\text{х}} =$	$U_{\text{инт}}^{\text{парал}} =$	$U_{\text{инт}}^{\text{посл}} =$
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее				

Обработка результатов измерений

1. Используя данные таблицы 1, рассчитайте градуировочную постоянную:

$$y = \frac{C_3 U_3}{U_{\text{инт сред}}^3}$$

2. Рассчитайте емкость неизвестного конденсатора:

$$C_{\text{эксп}}^x = y \frac{U_{\text{инт сред}}^x}{U_x}$$

3. Рассчитайте емкость параллельного соединения конденсаторов:

$$C_{\text{эксп}}^{\text{парал}} = y \frac{U_{\text{инт сред}}^{\text{парал}}}{U_{\text{парал}}}$$

4. Рассчитайте емкость последовательном соединении:

$$C_{\text{эксп}}^{\text{посл}} = y \frac{U_{\text{инт сред}}^{\text{посл}}}{U_{\text{посл}}}$$

5. Занесите результаты расчётов в таблицу 2

Таблица 2

Неизвестная емкость C_x мкФ		Емкость соединения С, мкФ			
		Параллельное		Последовательное	
$C_{\text{экс}}^x$ Эксперимен- тальное	$C_{\text{изм}}^x$ Измеренное	$C_{\text{экс}}^{\text{парал}}$ Эксперимен- тальное	$C_{\text{расч}}^{\text{парал}}$	$C_{\text{экс}}^{\text{посл}}$	$C_{\text{расч}}^{\text{посл}}$
$\varepsilon_3 =$		$\varepsilon_{\text{парал}} =$		$\varepsilon_{\text{посл}} =$	

6. Используя значения емкостей $C_{\text{эксп}}^x$ и C_3 , по формулам для параллельного и последовательного соединений конденсаторов рассчитайте:

$$C_{\text{расч}}^{\text{парал}} = C_{\text{эксп}}^x + C_3$$

$$C_{\text{расч}}^{\text{посл}} = \frac{C_3 C_{\text{эксп}}^x}{C_3 + C_{\text{эксп}}^x}$$

7. Найдите относительное отклонение экспериментальных значений от расчетных при параллельном и последовательном соединениях конденсаторов.

$$\varepsilon_{C \text{ парал}} = \frac{|C_{\text{экс}}^{\text{парал}} - C_{\text{расч}}^{\text{парал}}|}{C_{\text{расч}}^{\text{парал}}} \times 100\%$$

$$\varepsilon_{C \text{ посл}} = \frac{|C_{\text{экс}}^{\text{посл}} - C_{\text{расч}}^{\text{посл}}|}{C_{\text{расч}}^{\text{посл}}} \times 100\%$$

Контрольные вопросы

1. Конденсаторы (устройство, назначение, виды). Основная характеристика конденсаторов.
2. Вывод формулы емкости плоского конденсатора.
3. Вывод формул для последовательного и параллельного соединения конденсаторов.
4. Если конденсатор остается подключенным к источнику напряжения, как изменится заряд на обкладках конденсатора при введении диэлектрика и при увеличении расстояния между его пластинами.
5. Если конденсатор отключить от источника, как изменится напряжение между его обкладками при введении диэлектрика и при увеличении расстояния между его пластинами.

Лабораторная работа №14

Оптика. Лабораторный оптический комплекс ЛКО-3П

Описание установки

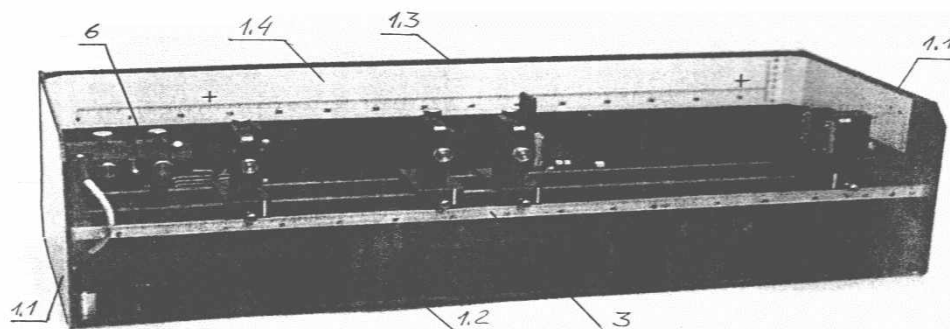


Рисунок 1 – Общий вид лабораторной установки ЛКО-3П

Лабораторный оптический комплекс ЛКО-3П позволяет изучать закономерности геометрической оптики, интерференции, дифракции, поляризации. Общий вид установки ЛКО-3П приведен на рисунке 1. Каркас установки состоит из двух боковин 1.1, стянутых оптической скамьей 3, плитой-основанием 1.2 и задней стенкой 1.3. В задней части каркаса размещена кассета с объектами. Вдоль каркаса размещена *оптическая скамья 3, состоящая из двух рельс со шкалой (линейкой) с ценой деления 2 мм*. Оптическая ось установки расположена симметрично относительно оптической скамьи на высоте 45 мм от верхнего края рельс.

На задней стенке каркаса размещен *экран. Он содержит шкалу длиной 73 см с ценой деления 1 мм*. Ноль шкалы экрана расположен напротив ноля линейки оптической скамьи (смещение не более 1 мм). Над шкалой изображены два визирных креста с координатами 13,0 и 70,0 см, используемые при настройке установки. Центры крестов находятся на уровне оптической оси установки. Схема излучателя приведена на рисунке 2. Лазер, смонтированный со схемой стабилизации тока в оправе 5, вставлен в трубу 7, закрепленную подвижно в корпусе 3. Корпус установлен на двух стойках 11.

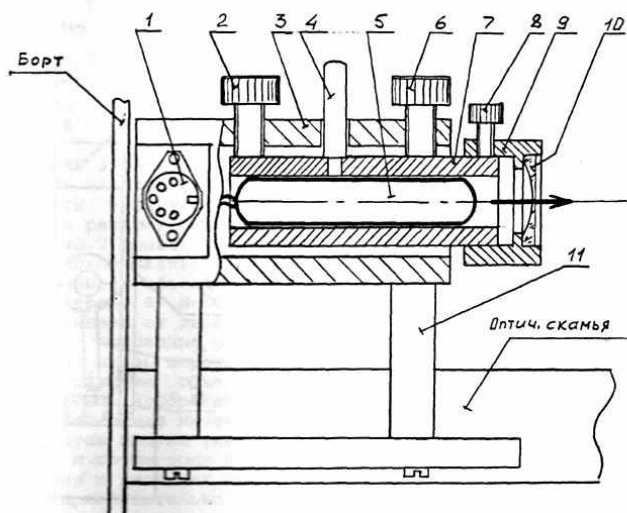


Рисунок 2 – Схема излучателя

Излучатель 6 (лазер в держателе с 5 степенями свободы) установлен на оптической оси установки над оптической скамьей. С помощью отражателя микропроектора исследуемое излучение направляется на экран, расположенный на задней стенке каркаса.

Двумя передними винтами 6 и двумя задними винтами 2 лазер можно перемещать относительно корпуса, подбирая нужное положение и направление пучка излучения. Насадка 9 с рассеивающей линзой 10 (объект 42) позволяет получить расходящийся пучок излучения. Насадка крепится на трубе излучателя винтом 8. Питание подается через разъем 1.

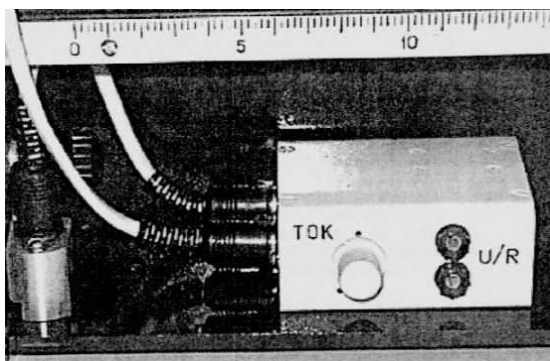


Рисунок 3 – Источник тока «ЛАЗЕР»

В комплексе ЛКО-3П установлен регулируемый стабилизированный источник тока для лазерного излучателя (рисунок 3). Разъем питания лазера соединен кабелем с разъемом «ЛАЗЕР» источника тока. К разъему питания «ПИТ» источника тока подключен переносной блок питания.

Ручкой «ТОК» регулируют ток лазера в пределах 20 – 60 мА. Для измерения тока измеряют выведенное на гнезда «U/R» напряжение U на резисторе $R=100$ Ом, включенном последовательно с лазером. Ток лазера $I=U/R$.

Функциональные модули

При выполнении лабораторных работ на комплексе ЛКО-3П используются **8 функциональных модулей**. Функциональные модули размещены и установлены на рейтерах (двухкоординатном и поворотном держателях). Рейтеры обеспечивают установку модулей на оптической скамье и перемещение модулей вдоль оптической скамьи. Держатели обеспечивают юстировочные перемещения модулей. Номера модулей нанесены на их корпусах.

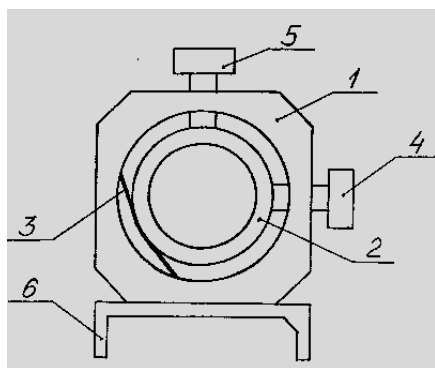
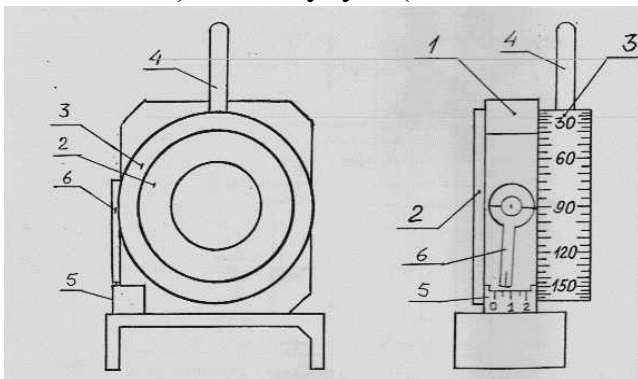


Рисунок 4 – Двухкоординатный держатель

Двухкоординатный держатель (рисунок 4) состоит из корпуса 1 и обоймы 2, удерживаемой пружинами 3 и перемещаемой двумя винтами 4 и 5 в пределах 2 мм от среднего положения по горизонтали и по вертикали. Корпус закреплен на рейтере 6. обойма может поворачиваться на произвольный угол вокруг горизонтальной оси (оптической оси установки).

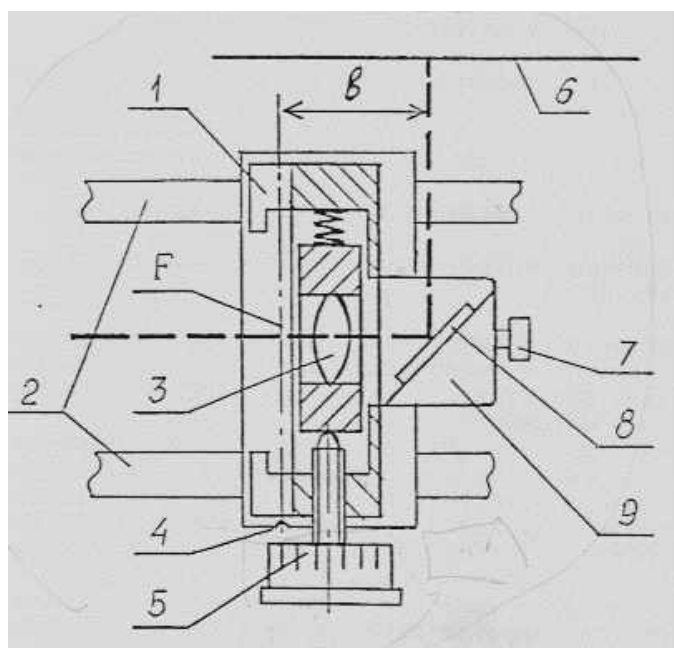
Поворотный держатель (рисунок 5) состоит из корпуса 1 и обоймы 2, соединенной с круговой шкалой 3. Поворот обоймы вокруг оси О-О производится рукояткой 4. Отсчет угловых координат производится по основной шкале 3 деления 2^0 и нониусу 5 (цена деления $0,5^0$).



Рычаг 6 поворачивают до совпадения его горизонтальной риски с одним из делений основной шкалы и снимают отсчет по нониусу. Таким методом можно снимать отсчеты с разрешением $0,1^0$ при погрешности порядка $0,2^0$. Углы поворота определяются как разности угловых координат.

Рисунок 5 – Поворотный держатель

Для введения модуля в оптическую схему следует поставить соответствующий рейтер на оптическую скамью. При необходимости рейтер может быть закреплен на оптической скамье винтом.

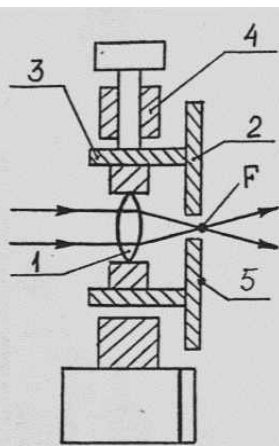
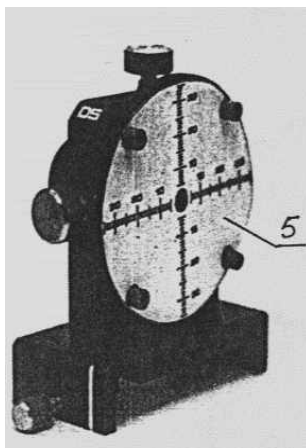


Модуль 2 (микропроектор, рисунок 6) предназначен для наблюдения на экране установки мелко-масштабных распределений интенсивности и изучаемых объектов, а также для измерения размеров объектов и распределений интенсивности. На рисунке 6 приведен вид сверху на этот модуль, установленный на оптической скамье 2. Объекты или распределения интенсивности, расположенные в объектной плоскости кассеты 1, изображаются линзой 3 на экране 6. Необходимый для этого поворот

Рисунок 6 – Микропроектор

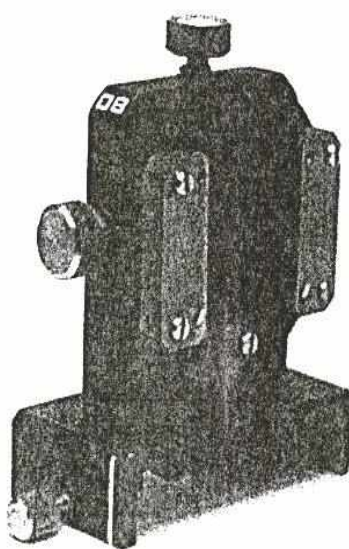
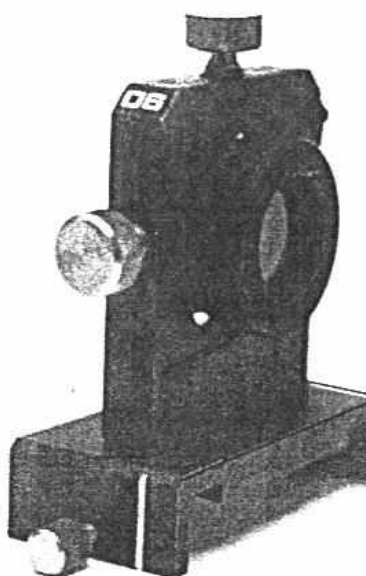
пучка осуществляется отражением от зеркала 8, закрепленного на кронштейне 9. Для наблюдений в прямом пучке кронштейн 9 с зеркалом можно снять, отвернув два винта 7. Расстояние $b=30$ мм полезно знать при «нацеливании» изображения на нужную точку экрана с соблюдением перпендикулярно отраженного пучка по отношению к оптической оси.

Модуль 5 (конденсор, рисунок 7) содержит короткофокусную линзу 1 и экран



2, расположенный в фокальной плоскости линзы и установленный посредством обоймы 3 в двухкоординатном держателе 4. На экране нанесена двухкоординатная шкала 5. Пучок лазерного излучения собирается в фокусе линзы F , формируя «точечный источник» в плоскости экрана.

Рисунок 7 – Конденсор



Модуль 6 (объектив, рисунок 8) содержит тонкую линзу с фокусным расстоянием $F=+100$ мм в двухкоординатном держателе. Предназначен для формирования пучков излучения (как правило, совместно с модулем 5) и для опытов по геометрической оптике.

Рисунок 8 – Объектив

Рисунок 9 – Модуль для установки экранов

Модуль 8 (рисунок 9) содержит кассету для установки экранов с изучаемыми объектами в двухкоординатном держателе.

Модуль 10 (рисунок 10) содержит кассету, а **модуль 12 (рисунок 11)** – поляризатор, которые могут поворачиваться вокруг оптической оси установки. Плоскость поляризатора (т.е. плоскость колебаний вектора E излучения, прошедшего через поляризатор) установлена параллельно направлению рукоятки 1 шкалы поворотного держателя.



Рисунок 10 – Модуль с кассетой

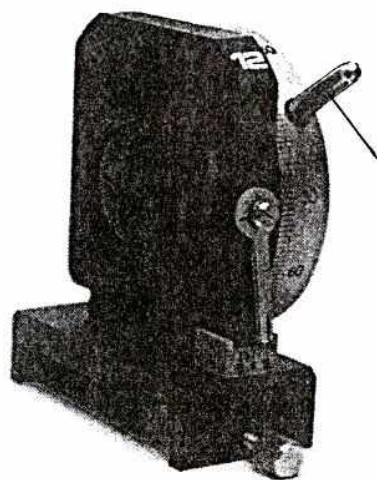


Рисунок 11 – Поляризатор

Модуль 13 (стол поворотный, рисунок 12) предназначен для установки объектов с возможностью поворота вокруг вертикальной оси, а также для отсчета угловых координат и углов поворота. Поворот стола производится ручкой 1. Отсчет угловых координат производится по основной шкале 2 (цена деления 2°) и нониусу 3 (цена деления $0,5^\circ$). Рычаг 4 поворачивают до совпадения его вертикальной риски с одним из делений основной шкалы и снимают отсчет по основной шкале.

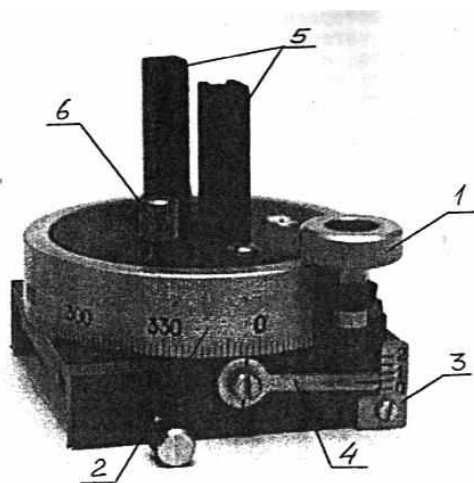


Рисунок 12 – Поворотный стол

К полученному значению прибавляют отсчет по нониусу. Таким методом можно снимать отсчеты с разрешением $0,1^\circ$, при погрешности порядка $0,2^\circ$, углы поворота определяют, как разности угловых координат. Объекты вставляют в кронштейны 5; винтом 6 регулируют наклон платформы стола и установленного на столе объекта.

Набор объектов

При выполнении лабораторных работ помимо функциональных модулей используется также ряд объектов. Большая часть объектов – тонкие пластины, пленки или линзы, расположенные в средней плоскости соответствующего экрана. При установке экрана в кассету функционального модуля эта плоскость оказывается напротив риски рейтера или иной характерной отметки на модуле. Тем самым определяется координата объекта на оптической скамье.

Объект №1 – сетка с шагом 1 мм, используется для калибровки увеличения оптических устройств.

Объект № 5 – плоскопараллельная стеклянная пластина толщиной 4-8 мм. Точное значение толщины указывается в описании работы или определяется самостоятельно.

Объекты № 15-24 и 27-36 – пленки с определенным распределением коэффициента пропускания. Качество пленок соответствует требованиям голографии. Пленки чувствительны к механическим воздействиям и их нельзя трогать пальцами.

Объект № 25 – раздвижная щель.

Объект №38 – фотодатчик, содержит фотодиод в светонепроницаемой оправе с входным окном. Датчик установлен на стандартном экране размерами 40X80 мм, который вставляется в кронштейны поворотного стола, при этом окно датчика оказывается на уровне оптической оси установки. Фототок измеряют в режиме «короткого замыкания» датчика.

Объект № 39 – пластина слюды толщиной 30 – 60 мкм. В плоскости пластины находятся две главные оси кристалла, соответствующие показателям преломления $n_1=1,59$, $n_2=1,594$.

Объект №44 – кювета для жидкостей. Предназначена для изучения оптических явлений при прохождении света через жидкость. Длина столба жидкости равна 120 мм. Для заполнения жидкостью отворачивают крышку кюветы, снимают защитное стекло и наливают жидкость так, чтобы получить слегка выпуклый мениск. Затем кладут стекло на мениск и закручивают без воздушных пузырей.

Объект № 45 – свободный экран, в который можно установить интересующий объект. Белая наклейка со шкалой служит экраном при наблюдениях в прямом пучке лазера.

Настройка установки

Настройка заключается в фиксации лазерного луча и центров оптических элементов на оптической оси установки, расположенной на высоте 40 мм от верхней плоскости рейтеров. Совместную настройку группы оптических элементов называют *юстировкой*. Индикатором юстировки является микропроектор. Положение оптической оси после юстировки определяется положением центра линзы микропроектора.

Грубая юстировка. Поворотом винтов на корпусе лазера установите трубу с лазером в средней части корпуса и направьте пучок излучения вдоль оптической скамьи.

Точная юстировка. Установите микропроектор в положение с координатой риски 10,0 см, при этом точка выхода пучка после отражения от зеркала будет иметь координату 13,0 см и окажется напротив левого визирного креста

экрана. Поворотом передних – считая от точки испускания излучения – винтов лазера совместите центр светового пятна с визирным крестом на экране. Отодвиньте микропроектор до положения с координатой риски 67,0 см, при этом точка выхода пучка после отражения от зеркала будет иметь координату 70,0 см и окажется напротив правого визирного креста экрана. Поворотом задних винтов излучателя совместите центр светового пятна с центром визирного креста. Операцию точной юстировки повторите 2-3 раза, пока смещение светового пятна от номинального положения при перемещении микропроектора не окажется меньше радиуса этого пятна.

При установке на рельс каждого нового оптического элемента прежде всего, с помощью винтов держателя этого элемента, добивайтесь возвращения центра пятна на экране в то же место, что и при юстировке лазерного луча. Это означает, что центр оптического элемента находится на оптической оси установки, и можно приступать к эксперименту или размещать на рельсе следующие элементы. В процессе эксперимента можно, смещая элементы винтами двухкоординатных держателей, перемещать картину на экране в положение, удобное для наблюдений или измерений.

Контрольные вопросы

1. Строение лабораторного оптического комплекса ЛКО-3П.
2. Расскажите о функциональных модулях комплекса.
3. Набор объектов лабораторного оптического комплекса ЛКО-3П.
4. Настройка установки: грубая и точная юстировки комплекса.

Лабораторная работа № 15

Измерение показателей преломления твердых тел

Цель работы: знакомство с устройством и работой лабораторного комплекса ЛКО-3П; ознакомление с методами определения показателей преломления прозрачных твердых тел.

Оборудование: модули: конденсор с экраном 5, объектив 6, микропроектор 2, поворотный стол 13; **набор объектов:** пластмассовая пластина 6, призма 9, стеклянная пластина 5.

Краткая теория.

Закон преломления и отражения света.

В геометрической оптике основным положением является приближение, в котором длина волны света λ стремится к нулю. При этом световой поток в геометрической оптике считается совокупностью отдельных независимых световых лучей, каждый из которых подчиняется законам преломления и отражения света. В оптически изотропной среде лучи перпендикулярны к фронту волны в каждой точке фронта и описывают движение фронта световой волны в пространстве. При падении световой волны на плоскую границу раздела двух диэлектриков с разными значениями относительной диэлектрической проницаемости световая волна частично отражается и частично преломляется. Характеристиками сред в данном случае является скорость распространения света в них: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, ϵ – относительная

диэлектрическая проницаемость среды, μ – относительная магнитная проницаемость среды (для подавляющего большинства диэлектрических сред $\mu \approx 1$).

Отношение

$$n = \frac{c}{v} \approx \sqrt{\epsilon} \quad (1)$$

называется **абсолютным показателем преломления** света. Отношение

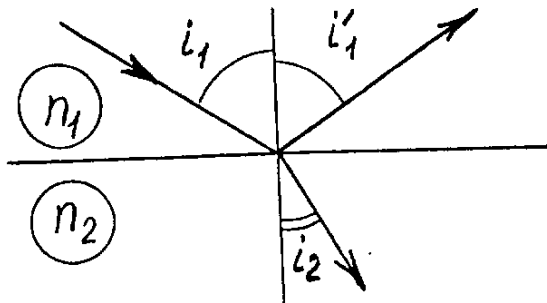
$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

называется **относительным показателем преломления** света средой 2 по отношению к среде 1.

Формулы (1), (2) справедливы только для волн, частоты которых малы по сравнению с частотой процессов в атомах и молекулах среды. Вследствие дисперсии показателя преломления данные формулы справедливы лишь для монохроматических волн. При падении световой волны на идеальную плоскую границу раздела 2-х диэлектриков, размеры которой значительно превышают длину волны, выполняются законы: **закон отражения:** угол между направлением распространения отраженной волны и нормалью к границе раздела i'_1

(угол отражения) равен по абсолютной величине соответствующему углу для падающей волны i_1 (рисунок 1).

закон преломления света: угол между направлением распространения пре-



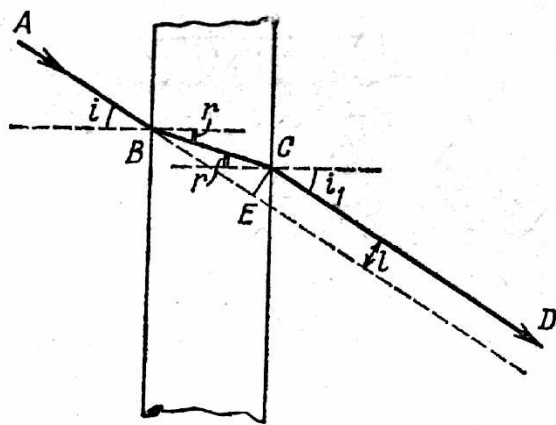
ломленной волны и нормалью к границе раздела (угол преломления i_2) связан с углом падения законом:

$$n_{21} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления сред.

Рисунок 1 – Закон отражения

Прохождение света через плоскопараллельную пластинку.



Пусть луч АВ (рисунок 2) падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку. В стекле он преломится и пойдет в направлении ВС. В точке С он снова преломится и выйдет из пластинки в направлении CD. Докажем, что луч CD, выходящий из пластинки, параллелен падающему на пластинку лучу АВ.

Рисунок 2 – Плоскопараллельная пластинка

Для преломления в точке В имеем: $\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (4)$

где n – показатель преломления пластинки. Для преломления в точке С закон (3) дает:

$$\frac{\sin r}{\sin i_1} = \frac{1}{n} \quad (5)$$

так как в этом случае луч выходит из пластинки в воздух. Перемножив выражения (1.4) и (1.5), находим:

$$\sin i = \sin i_1, \quad (6)$$

или, так как $i < 90^\circ$ и $i_1 < 90^\circ$, $i = i_1$, откуда следует, что лучи АВ и CD параллельны.

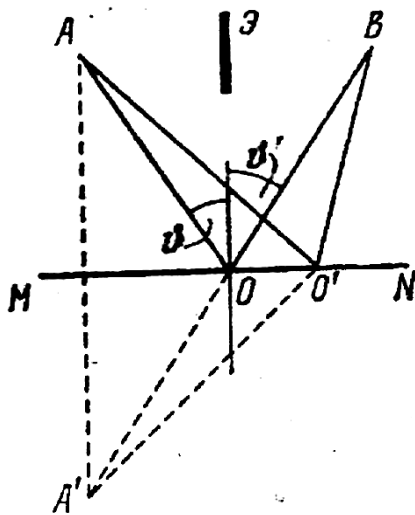
Луч CD смещен в сторону относительно падающего луча АВ. Величина смещения $h = EC$ зависит от толщины пластинки и углов падения и преломления. Смещение, очевидно, тем меньше, чем тоньше пластинка. Расстояние, на которое смещает пластинка лучи света можно найти по формуле:

$$h = d \sin i \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n^2 - \sin^2 i}} \right), \text{ где } d - \text{толщина пластинки} \quad (7)$$

Принцип Ферма.

В основу геометрической оптики может быть положен принцип Ферма. Из этого принципа вытекают законы прямолинейного распространения, отражения и преломления света. В формулировке самого Ферма принцип гласит, что **свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время.**

Для прохождения участка пути ds (рисунок 3), свету требуется время $dt = ds/v$, где v – скорость света в данной точке среды. Считая что $v = c/n$, получим $dt = (1/c)nds$. Следовательно, время τ , затрачиваемое светом на прохождение пути от точки 1 до точки 2 равно:



$$\tau = \frac{1}{c} \int_1^2 nds \quad (8)$$

Имеющая размерность длины величина

$$L = \int_1^2 nds \quad (9)$$

называется **оптической длиной пути**. В однородной среде оптическая длина равна произведению геометрической длины пути s на показатель преломления среды n :

$$L = ns. \quad (10)$$

Согласно (8):

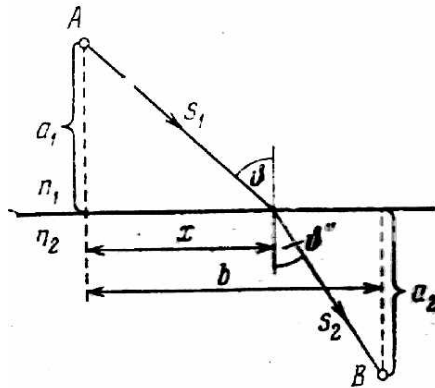
$$\tau = \frac{L}{c}. \quad (11)$$

Рисунок 3 – Линейное распространение света

Пропорциональность времени прохождения τ оптической длине пути L дает возможность сформулировать принцип Ферма следующим образом: **свет распространяется по такому пути оптическая длина которого минимальна.**

Из принципа Ферма вытекает обратимость световых лучей: оптический путь, который минимален в случае распространения света из точки 1 в точку 2, окажется минимален в случае распространения света в обратном направлении. Следовательно, луч, пущенный навстречу лучу, проделавшему путь от точки 1 до точки 2, пойдет по тому же пути, но в обратном направлении. **Получим при помощи принципа Ферма законы отражения и преломления света.** Пусть свет попадает из точки А в точку В, отразившись от поверхности

MN (рисунок 4). Среда в которой проходит луч однородна. Поэтому минимальность оптической длины пути сводится к минимальности его геометрической длины. Геометрическая длина произвольно взятого пути равна $AO'B=A'O'B$ (вспомогательная точка A' является зеркальным отображением точки A).



Из рисунка 4 видно, что наименьшей длиной обладает путь луча, отразившегося в точке O , для которой угол отражения равен углу падения. При удалении точки O' от точки O геометрическая длина пути неограниченно возрастает, так что в данном случае имеется только один экстремум – минимум.

Рисунок 4 – Оптическая длина пути

Теперь найдем точку, в которой должен преломиться луч, распространяясь от A к B , чтобы оптическая длина пути была экстремальна (рисунок 4), для произвольного луча оптическая длина пути:

$$L = n_1 s_1 + n_2 s_2 = n_1 \sqrt{a_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{a_2^2 + (b-x)^2} \quad (12)$$

Чтобы найти экстремальное значение, продифференцируем L по x и приравняем производную к нулю:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{a_1^2 + x^2}} - \frac{n_2 (b-x)}{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = n_1 \frac{x}{s_1} - n_2 \frac{b-x}{s_2} = 0 \quad (13)$$

Множители при n_1, n_2 равны соответственно $\sin \nu_1$ и $\sin \nu_2$. таким образом, получается соотношении $n_1 \sin \nu_1 = n_2 \sin \nu_2$

(14)

выражающее закон преломления света.

Ход работы

Задание 1. Преобразование пучка света линзами. Это пробный эксперимент, дающий первое знакомство с установкой.

1. Включите питание лазера, установите на оптическую скамью микропроектор (модуль 2) и выполните юстировку установки по описанной выше методике.
2. Пронесите лист бумаги вдоль пучка излучения лазера, проследите его ход.
3. Установите короткофокусную линзу – конденсор (модуль 5) в непосредственной близости от излучателя.
4. Исследуйте пучок после линзы, наблюдайте его расходимость. Убедитесь в том, что в фокальной плоскости линзы (плоскость экрана модуля 5) сформировался «точечный источник» света.
5. Поставьте после конденсора объектив (модуль 6). Исследуйте пучок после объектива при различных его положениях. Перемещая объектив, добейтесь получения расходящейся, сходящейся и, наконец, плоской волны.

6. Научитесь фокусировать волну в объектной плоскости микропроектора путем перемещения объектива (когда световая волна, вышедшая из линзы-конденсора 5 после прохождения через объектив 6 оказывается сфокусированной в объектной плоскости микропроектора 2, на экране на задней стенке установки мы видим светящуюся точку минимального размера и максимальной яркости).
7. Определите минимальное расстояние между микропроектором и линзой-конденсором, при котором такая фокусировка возможна. Для этого приближайте микропроектор к конденсору с некоторым шагом (порядка 3-5 см) и для каждого нового положения микропроектора проверяйте возможность фокусировки, перемещая объектив по всему отрезку между конденсором и микропроектором.
8. Найдите положение модуля 2, при котором фокусировка получается при единственном положении объектива.

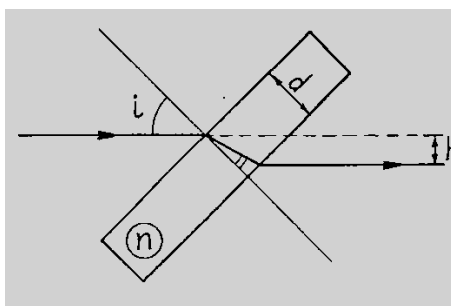


Рисунок 5 – Прохождение света через прозрачную пластину

Задание 2. Определение показателя преломления пластины

При прохождении света через прозрачную пластину толщиной d (рисунок 5) луч смещается на расстояние h , которое можно найти по формуле (7). При известном значении d для измерения показателя преломления пластины нужно исследовать зависимость h от угла падения i . Показатель преломления можно рассчитать по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{d^2 \sin^2 2i}{4(d \sin i - h)^2} + \sin^2 i} \quad (15)$$

1. Поставьте перед излучателем линзу-конденсор 5. Микропроектор 2 установите в конце оптической скамьи. Координата риски модуля 2 – 67,0 см. С помощью модуля 6 сфокусируйте излучение на экране.
2. Вплотную к модулю 2 установите поворотный стол 13 и вставьте в кронштейны стола изучаемую пластину – объект 6 ($d = 4\text{ мм}$). Угловая координата поворотного стола должна быть равна 0. Такая ориентация пластины соответствует нормальному падению ($i = 0$) пучка света на пластину.
3. Регулировочными винтами модуля 6 установите сфокусированное пятно, оказавшееся в увеличенном виде на экране задней стенки установки, на отметку 70,0 см.
4. Поворачивайте поворотный стол с шагом 15° вначале по часовой стрелке,

затем против. Для каждого положения стола запишите смещение светового пятна на экране относительно исходной отметки (x_1 – смещение светового пятна при повороте стола по часовой стрелке, x_2 – против часовой стрелки).

5. Для расчетов смещение луча $h = \frac{H}{\beta} = \frac{x_1 + x_2}{2\beta}$, H – смещение луча на экране и β – увеличение микропроектора считать равным 18.
6. Рассчитайте показатель преломления пластинки по формуле (15).
7. Вычислите погрешности косвенных измерений и занесите результаты в таблицу 1.

Таблица 1

i°	$h, \text{ мм}$	n	n_{cp}	Δn_{cp}	$\varepsilon_n, \%$
15 ⁰					
30 ⁰					
40 ⁰					
45 ⁰					

8. Представьте окончательный результат в виде:

$$n = n_{cp} \pm \Delta n_{cp}, \varepsilon_n = \dots \%$$

9. Проведите те же измерения с объектом №5 – стеклянной плоскопараллельной пластиной ($d = 4,3 \text{ мм}$). Необходимо выполнить 4 измерения смещения светового пятна для тех же углов падения (один раз при повороте стола 13 по часовой стрелке, другой раз – против часовой стрелки). Результаты заносим в таблицу 2.

Таблица 2

i°	$h, \text{ мм}$	n	n_{cp}	Δn_{cp}	$\varepsilon_n, \%$
15 ⁰					
30 ⁰					
40 ⁰					
45 ⁰					

10. Представьте окончательный результат в виде:

$$n = n_{cp} \pm \Delta n_{cp}, \varepsilon_n = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?
2. Показать эквивалентность двух формулировок принципа Ферма.
3. Сформулируйте законы геометрической оптики.
4. Вывести законы отражения и преломления света на основе принципа Ферма.
5. Какова скорость света в использованных в работе веществах?

Лабораторная работа № 16

Измерение показателя преломления прозрачных веществ с помощью микроскопа

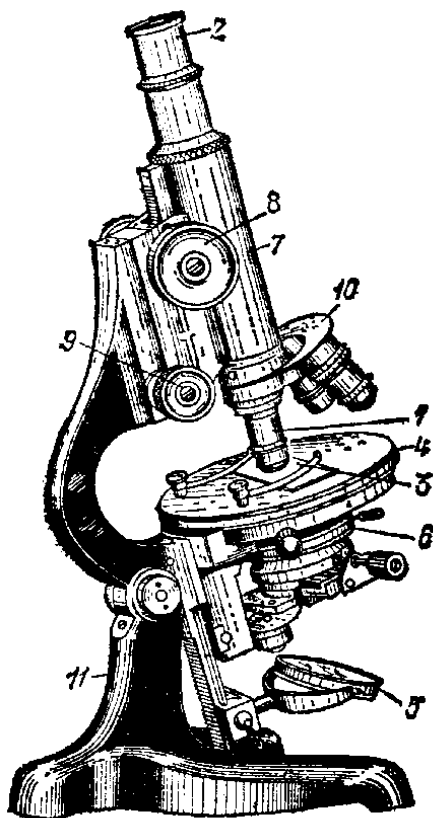
Цель работы: ознакомление с одним из методов определения показателей преломления прозрачных твёрдых тел.

Приборы и принадлежности: микроскоп, микрометр (штангенциркуль), набор прозрачных пластинок с нанесёнными на их поверхностях рядами продольных и поперечных штрихов, осветитель.

Краткая теория.

Микроскоп

Глаз, невооружённый никаким оптическим приспособлением, на расстоянии наилучшего зрения (25 см) различает мелкие структурные образования (точки и линии) на поверхности тела или внутри прозрачного образца с разрешением (при расстоянии между ними) 0,08 мм. Для того, чтобы рассматривать предметы с более мелкими деталями (структурой), нужно увеличить угол, под которым они наблюдаются (угол зрения). Этого можно достичь с помощью лупы или микроскопа.



На рисунке 1 представлен микроскоп. Основные части оптической системы микроскопа:

1. объектив;
2. окуляр, размещаются на концах цилиндрической трубки, укрепленной в штативе;
3. исследуемый объект помещается на предметном столике;
4. предметный столик, который освещается снизу с помощью зеркала и конденсора;
5. зеркало;
6. конденсор;
7. тубус - металлическая труба, в которой установлены оправы объектива и окуляра;
8. микрометрический винт (кремальеры) с помощью которого осуществляется наводка на резкое изображение предмета;
9. микрометрического винта 9 (точная наводка);
10. револьвера служит для быстрой;
11. массивный штатив, на котором укреплены тубус и столик.

Рисунок 1 – Микроскоп

Микроскоп как оптическое устройство включает в себя кроме оптической части ещё и часть механическую. К механической подсистеме относятся приспособления, предназначенные для закрепления исследуемого объекта и для его

перемещения в различных направлениях относительно тубуса микроскопа; предметный столик с препаратом и винты грубой наводки (кремальера) и тонкой наводки (микрометрический), а также штатив и тубусодержатель. К оптической системе относятся, прежде всего, объектив и окуляр, позволяющие увеличить угол зрения, под которым производится наблюдение, и устройство для освещения объекта (зеркало и конденсор) и регулирования освещения (ириновая диафрагма). На рисунке 2 представлена схема хода лучей в микроскопе.

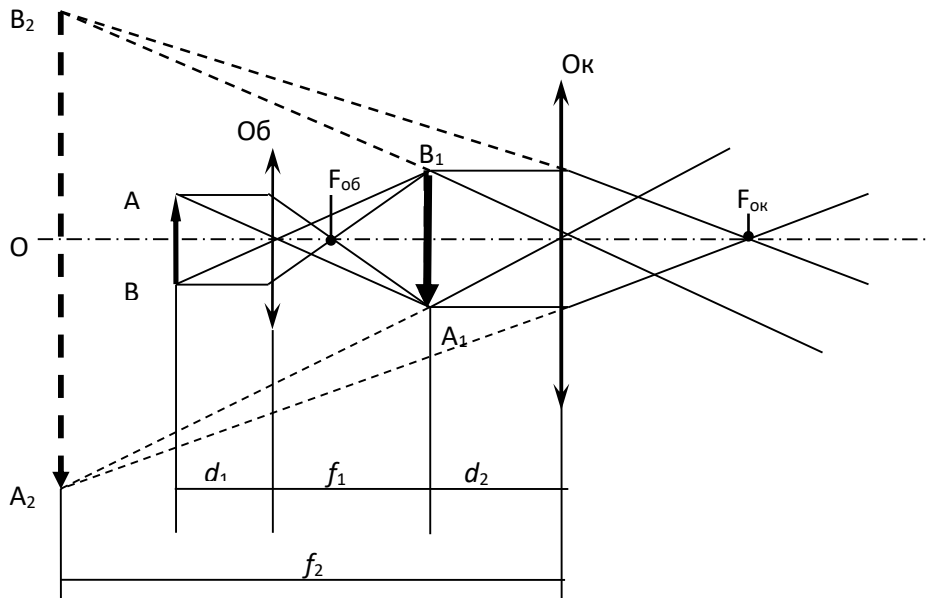


Рисунок 2 – Схема хода лучей в микроскопе

Объектив (Об) создаёт действительное, увеличенное изображение A_1B_1 рассматриваемого объекта AB . Изображение, даваемое объективом, затем рассматривается через окуляр (Ок), действующий как лупа; A_2B_2 -мнимое, увеличенное изображение, полученное с помощью окуляра.

Для получения достаточно большого увеличения с помощью микроскопа необходимо, чтобы расстояние от объекта до объектива (до его передней главной плоскости) должно очень мало отличаться от его фокусного расстояния $d_1 \geq F_{об}$, как и расстояние от первичного изображения, получаемого с помощью объектива, от окуляра - от фокусного расстояния последнего. Поэтому увеличения, даваемые объективом и окуляром, можно приближённо выразить так:

$$\Gamma_{об} \approx \frac{l}{F_{об}} \text{ и } |\Gamma_{ок}| \approx \frac{L}{F_{ок}} \quad (1)$$

где l - длина тубуса микроскопа, а L - расстояние наилучшего зрения. Более точные формулы этих увеличений имеют вид:

$$\Gamma_{об} \cong \frac{l - F_{об} - F_{ок}}{F_{об}} \text{ и } |\Gamma_{ок}| = \frac{L}{l - f_1} \quad (2)$$

Увеличение, обеспечиваемое микроскопом, равно:

$$|\Gamma_{мкр}| = \Gamma_{об} \cdot |\Gamma_{ок}| = \frac{lL}{F_{об}F_{ок}} \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что увеличение, получаемое микроскопом, растет с уменьшением фокусного расстояния объектива и окуляра. Увеличение нельзя сделать сколь угодно большим из-за явления дифракция света, обусловленной его волновой природой. Наибольшее увеличение, получаемое с помощью оптического микроскопа, достигает 1350.

Аббе разработал дифракционную теорию светового микроскопа, согласно которой формирование изображения происходит благодаря двум эффектам. Сначала имеет место дифракция света на микроскопических деталях объекта, а затем, после прохождения дифрагированных световых пучков через объектив, происходит их интерференция.

С особенностями образования дифракционного изображения точечного объекта (точечного источника или рассеивателя света) связана разрешающая способность микроскопа. Когда две светящиеся точки находятся на не слишком малом расстоянии друг от друга (не меньшем длины световой волны), то при рассматривании их через микроскоп они видны раздельно. Если же эти точки сближаются, то их изображения (центральные светлые пятна, окружённые несколькими светлыми кольцами значительно меньшей интенсивности) начинают накладываться друг на друга, а затем практически сливаются в одно. Изображения двух источников (светлые пятна) можно ещё различать при условии, что центр одного из светлых пятен находится в середине первого тёмного кольца, окружающего второе светлое пятно (критерий Рэля). Разрешающей способностью микроскопа называется величина, обратная тому наименьшему расстоянию δ между двумя элементами структуры ("точками"), при котором они ещё могут быть видимы раздельно. Теория микроскопа приводит к формуле: $\delta = 1,22\lambda / (2n\sin\varphi)$, (4)

где λ - длина волны используемого монохроматического света;

$n \sin\varphi$ - числовая апертура объектива имеет величину, близкую к единице;

n - показатель преломления среды, находящейся между предметом и объективом; φ - угол между одним из крайних лучей, попадающих в объектив, и оптической осью объектива (рисунок 2).

Из формулы (4) видно, что улучшения (увеличения) разрешающей способности микроскопа можно добиться как за счет уменьшения длины волны λ используемого света, так и увеличения числовой апертуры. Первый способ реализуется при использовании ультрафиолетового и даже рентгеновского излучений, а также электронных и ионных пучков. Второй способ основан на использовании иммерсионных жидкостей (между предметом и объективом) с показателями преломления от 1,3 до 1,8.

Показатель преломления

В электродинамике Максвелла установлено, что скорость распространения электромагнитных волн (в том числе и световых) в веществе определяется его диэлектрической и магнитной проницаемостями:

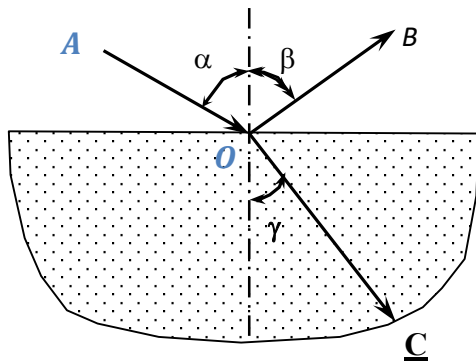
$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} \quad (5)$$

Для вакуума $\varepsilon = \mu = 1$ и скорость распространения света в нём равна

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) видно, что в любом прозрачном веществе скорость света меньше, чем в вакууме в $\sqrt{\varepsilon\mu}$ раз. Значит, абсолютный показатель преломления вещества: $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$. (7)

Поскольку для всех неферромагнетиков (каковыми являются все прозрачные вещества) $\mu = 1$, то $n = \sqrt{\varepsilon}$. При прохождении света через границу раздела двух прозрачных сред с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 падающий луч АО (рисунок 3) разделяется на два луча: OB – отражённый луч и OC



– луч преломлённый. Оба эти луча лежат в той плоскости, в которой находятся луч падающий и нормаль к границе раздела сред в точке падения луча АО. Кроме этого, угол падения равен углу отражения, $\alpha = \beta$, а при изменении угла падения α угол преломления γ также изменяется, но так, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления остаётся постоянным для данных двух сред.

Рисунок 3 – Графическое изображение отражения и преломления луча

Это отношение называется относительным показателем преломления

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (8)$$

Из формулы (1.8) с учетом (1.7) следует, что $n_{21} = n_2 / n_1$ или

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma \quad (9)$$

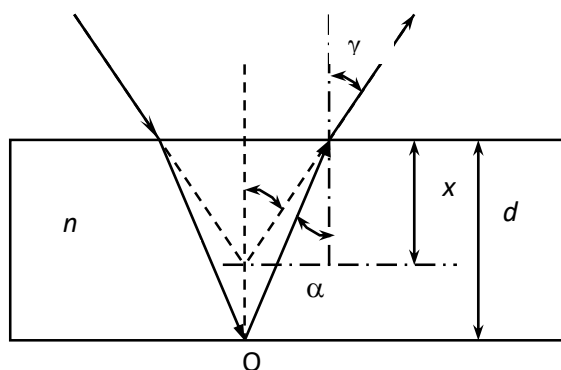
Если первой средой является воздух, для которого абсолютный показатель преломления очень близок к единице ($n = 1,0003$), то для системы "воздух-вторая среда" закон преломления можно записать:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n \quad (10)$$

где n - абсолютный показатель преломления второй среды.

Способ определения показателя преломления твёрдого вещества используя микроскоп, основан на том, что рассматриваемый предмет через достаточно толстый слой прозрачного вещества, (твёрдого или жидкого) с плоскими параллельными поверхностями, кажется расположенным по отношению к нам ближе, чем есть на самом деле. Объясняется это следующим образом.

Пусть мы смотрим на некоторую "точку" O через плоскопараллельную пластинку (рисунок 4); эта "точка" может быть, например, маленькой царапиной на нижней поверхности пластинки. От "точки" лучи идут по разным направлениям (рассеиваются). Возьмём луч OA , идущий в стекле и выходящий в воздух в точке A ; в этом случае угол преломления больше угла падения. Если луч AB попадает в глаз, то мы видим изображение "точки" O в положении D ; нам кажется, что "точка" O находится на расстоянии x от верхней грани пластинки, заметно меньшем её толщины d . Опираясь на правило обратимости лучей в геометрической оптике, можно записать закон преломления в виде:



$$n = \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} \quad (11)$$

Из треугольников OAC и DAC получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AC}{CO} = \frac{AC}{d}, \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{AC}{CD} = \frac{AC}{x} \quad (12)$$

Рисунок 4 – Ход лучей в пластине

При малости углов α и γ тангенсы этих углов можно заменить синусами, погрешности при этом оказываются весьма малыми, если же заменить отношение синусов малых углов отношением их тангенсов, то погрешность вообще оказывается ничтожно малой. При такой замене получается

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{AC \cdot d}{AC \cdot x} = \frac{d}{x}. \quad (13)$$

Сопоставляя выражения (11) и (13), получаем:

$$n = d/x \quad (14)$$

Отсюда видно, что **для определения показателя преломления стекла (или иного прозрачного материала) надо измерить действительную и кажущуюся толщину пластинки и затем взять их отношение.**

Ход работы

1. Измерьте (не менее трёх раз) микрометром (штангенциркулем) толщину пластинки.
2. С помощью зеркала, находящегося под предметным столиком микроскопа, и конденсора, направьте пучок света от осветителя так, чтобы поле зрения микроскопа было освещено хорошо и одинаково, но не слишком ярко.
3. Поместите исследуемую пластинку на предметный столик так, чтобы под центром объектива оказалось перекрестие продольной и поперечной рисок. Путём перемещения тубуса микроскопа или предметного столика при

иной конструкции с микроскопа добейтесь хорошей видимости сначала одной, а потом другой риски в средней части поля зрения, при этом можно слегка смещать саму пластинку.

4. Поворачивая головку микрометрического винта, опустите тубус микроскопа в крайнее нижнее положение и затем поставьте головку на "нуль". С помощью винта наводки (кремальеры) получите чёткое изображение риски, находящейся на нижней стороне пластинки.
5. Вращая микрометрический винт и считая число оборотов, поднимите тубус так, чтобы стала отчётливо видна риска, находящаяся на верхней стороне пластинки. Кажущаяся толщина пластинки будет равна

$$x = (0,1N + 0,002m) \text{ мм} \quad (15)$$

где N - число оборотов головки микрометрического винта; m - число делений на головке винта, характеризующее её последний неполный оборот; 0,1 и 0,002 - числа, показывающие (в мм) величину перемещения тубуса микроскопа (относительно предметного столика) при одном полном обороте головки микрометрического винта и при её повороте на одно деление.

6. Измерения провести не менее 5 раз (вообще нечётное число раз). Результаты измерений и расчётов занесите в таблицу.

Таблица

№ п/п	d , мм	d_{cp} , мм	Отсчет по головке		x , мм	n	n_{cp}	Δn	Δn_{cp}	$\varepsilon\%$
			N	m						
1										
2										
3										

7. По формуле (14) подсчитайте n и запишите результат в виде:

$$n = (n \pm \Delta n)$$

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?
2. Сформулируйте законы геометрической оптики.
3. Рассказать из каких основных элементов состоит микроскоп? Изобразить схему хода лучей в микроскопе.
4. Как определить увеличение, даваемое микроскопом? Что понимается под разрешающей способностью оптического прибора и от чего она зависит?
5. Какова скорость света в использованном в работе веществе?

Лабораторная работа № 17

Определение концентрации сахара в растворе с помощью поляриметра

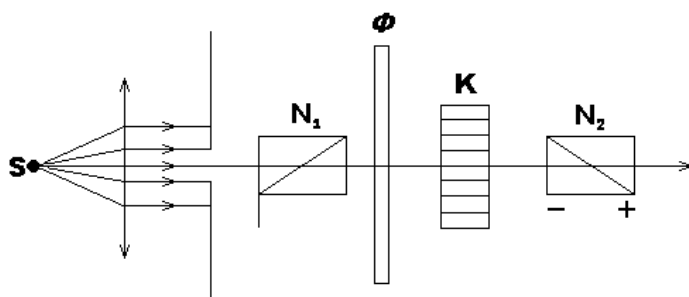
Цель работы: ознакомление с явлением вращения плоскости поляризации света оптически активными веществами и с использованием этого явления для определения концентрации сахара в водном растворе.

Приборы и принадлежности: круговой поляриметр СМ-1 или поляриметр портативный П-161-М, вложенные в них кюветы (трубки) с раствором сахара, источники света (фонарь с лампой накаливания или осветитель “Этюд”).

Краткая теория.

Вращение плоскости поляризации

Оптическая активность. Естественную оптическую активность вещества можно наблюдать с помощью следующей установки. Параллельный пучок света направляется на систему, изображённую на рисунке 1.



Между скрещёнными призмами Николя N_1 и N_2 расположены светофильтр Φ (для монохроматизации света) и пластинка из кристаллического кварца K , оптическая ось которой совпадает с направлением луча.

Рисунок 1 — Наблюдение оптической активности вещества

Так как вдоль оптической оси не происходит двойного лучепреломления, то при скрещённом положении николей свет не должен проходить через систему. Однако, как показал опыт, наблюдается прохождение света через систему. Это может произойти только в том случае, если пластинка кварца поворачивает плоскость поляризации на некоторый угол. Если это так, то вращением николя N_2 вокруг оси луча на тот же угол в противоположном направлении можно скомпенсировать поворот плоскости поляризации и добиться тем самым полного затемнения поля на экране. Описанный опыт полностью подтверждает это предположение. Вещества, способные вращать плоскость поляризации в отсутствие внешних воздействий, называются *оптически активными*. Оптическая активность, существующая в отсутствие какого-либо внешнего воздействия, называется *естественной*. Существует множество кристаллов и аморфных тел, обладающих оптической активностью (скипидар, камфара, никотин, раствор сахара, киноварь, биологические макромолекулы).

Принято определять направление вращения плоскости поляризации относительно наблюдателя, смотрящего навстречу падающему лучу. **Вращение**

называется правым (положительным), если плоскость поляризации поворачивается вправо (по часовой стрелке) для наблюдателя, и левым (отрицательным), если она поворачивается влево (против часовой стрелки).

На основе экспериментальных данных было установлено, что существуют две модификации кварца, одна из которых является правовращающей, а другая – левовращающей. Значение угла вращения в обоих случаях одинаково по абсолютной величине.

Опыты, проведённые с помощью установки, изображённой на рис. 1, при разных светофильтрах (разных длинах волн) и прочих равных условиях показали, что величина угла вращения плоскости поляризации зависит от длины волны, т. е. имеет место дисперсия вращательной способности.

Определение угла вращения. Опыты с пластинками кварца разной толщины показали, что для данной длины волны величина угла поворота плоскости поляризации прямо пропорциональна длине пути луча в оптически активной среде, т.е.

$$\varphi = \alpha l, \quad (1)$$

где φ – угол поворота плоскости поляризации; l – толщина пластинки; α – постоянная вращения, показывающая чему равен угол поворота при толщине пластинки 1 мм. Коэффициент α зависит от рода вещества, температуры и от длины волны прошедшего через него света.

В результате экспериментальных исследований, проведенных Био с жидкими оптически активными растворами, была установлена зависимость угла поворота от концентрации

$$\varphi = [\alpha] Cl, \quad (2)$$

где C – концентрация растворённого вещества, кг/м³;

$[\alpha]$ – удельное вращение, численно равное углу поворота плоскости поляризации при прохождении в растворе 1 метра при концентрации, равной 1 кг/м³. Величина $[\alpha]$ зависит, как и α , от длины волны используемого монохроматического света, а так же от температуры.

Био установил также следующую приближённую зависимость постоянной вращения α и удельным вращением $[\alpha]$ от длины волны λ

$$\alpha \sim 1/\lambda^2 \text{ и } [\alpha] \sim 1/\lambda^2. \quad (3)$$

Позже Друде установил, что

$$[\alpha] = \sum_{i=1}^n \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (4)$$

где A – постоянная величина; λ_i – длина волн, соответствующих собственным колебаниям системы.

Гипотеза Френеля. Объяснение вращения плоскости поляризации впервые было дано Френелем. Согласно гипотезе Френеля, вращение плоскости поляризации обусловлено особым типом лучепреломления, при котором волны, поляризованные вправо и влево по кругу, распространяются с

разной скоростью в оптически активном веществе. Знак угла вращения плоскости поляризации определяется соотношением скоростей циркулярно поляризованных волн V_l (для левокруговой волны) и V_{np} (для правокруговой волны). При $V_{np} > V_l$ оптически активное вещество, по Френелю, называется правовращающим (или просто “правым”) если же $V_{np} < V_l$, то левовращающим (или просто “левым”).

Можно показать, что гипотеза Френеля формально объясняет явление вращения плоскости поляризации. Линейно-поляризованную волну (E), как известно, можно разложить на две волны, поляризованные по правому (E_{np}) и по левому (E_l) кругам (рисунок 2). При $V_{np} = V_l$ число оборотов электрических векторов E_{np} и E_l в слое вещества толщиной l , будет одинаковым и результирующее (исходное) колебание будет происходить вдоль E , т.е. среда не обладает свойством оптической активности.

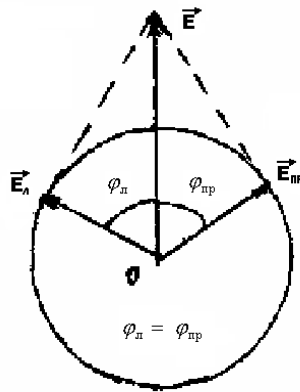


Рисунок 2 – Объяснение вращения плоскости поляризации

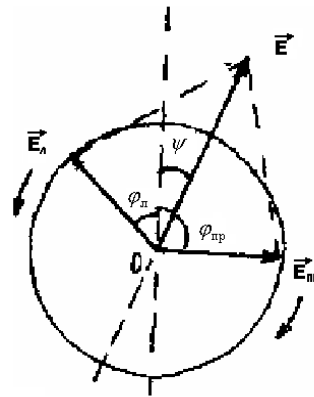


Рисунок 3 – Вычисление угла поворота плоскости поляризации

Если же $V_{np} \neq V_l$, то число оборотов векторов E_{np} и E_l различно и в итоге они повернутся на различные углы φ_{np} и φ_l , что приведёт к повороту результирующего вектора E на некоторый угол ψ . Исходя из предположения, что $V_{np} > V_l$, можно вычислить угол ψ (рисунок 3). После прохождения циркулярно-поляризованными волнами оптически активной среды толщиной l электрический вектор правой волны повернется вправо на больший угол, чем вектор левой волны, так как правая волна распространяется с большей скоростью. В итоге плоскость симметрии, разделяющая пополам сумму углов φ_{np} и φ_l , будет повернута вправо на угол ψ , определяемый из условия $\varphi_{np} - \psi = \varphi_l + \psi$. Отсюда

$$\psi = (\varphi_{np} - \varphi_l)/2, \quad (5)$$

Выразив φ_{np} и φ_l через время t и длину пути волн в оптически активной среде l

$$\varphi_l = \omega \left(t - \frac{l}{V_l} \right) \quad \text{и} \quad \varphi_{np} = \omega \left(t - \frac{l}{V_{np}} \right),$$

получим окончательное выражение для ψ

$$\psi = \frac{1}{2} \omega l \left(\frac{l}{V_l} - \frac{l}{V_{np}} \right). \quad (6)$$

Если фазовые скорости распространения левой и правой волн V_l и V_{np} выразить через соответствующие коэффициенты преломления n_l и n_{np} ($V_{np} = c/n_{np}$ и $V_l = c/n_l$) и принять во внимание что, $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{cT} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, где λ_0 - длина волны в вакууме, то получим

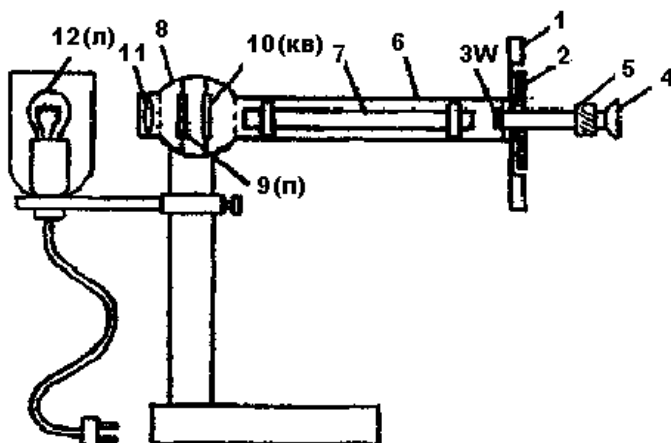
$$\psi = \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) (n_l - n_{np}). \quad (7)$$

Как следует из формулы (5.7), при $n_l > n_{np}$ ($V_l < V_{np}$) ψ является положительным, т.е. вращение плоскости поляризации происходит вправо, а при $n_l < n_{np}$ ($V_l > V_{np}$) ψ становится отрицательным, т.е. вращение происходит влево.

Поляриметры

Поляриметры применяются в научно-исследовательской работе, в ряде отраслей промышленности (химической, пищевой и др.) и в медицине для определения степени оптической активности вещества и связанных с нею физико-химических свойств этого вещества.

На рисунке 4 приведена схема кругового поляриметра. Измерительной частью *кругового поляриметра* является головка анализатора, состоящая из неподвижного лимба 1, диска 2 с двумя нониусами и анализатора 3 - они вращаются совместно, а также зрительной трубки 4, служащей для рассматривания поля зрения, разделенного на три части. Перемещением муфты 5 производится установка окуляра на резкое изображение границы и линий раздела поля зрения. С помощью той же муфты можно поворачивать анализатор и диск с нониусами.

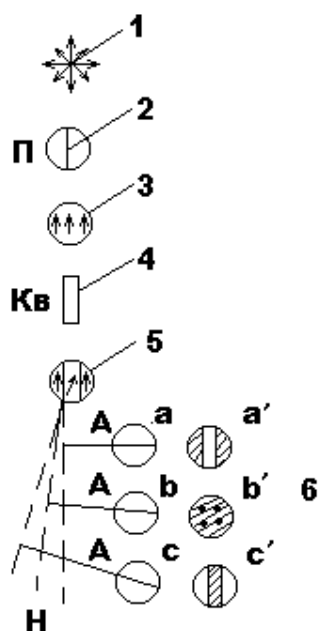


В головку поляризатора 8, повернутую в сторону источника света 12, входят поляризатор 9, кварцевая пластинка 10 и конденсор 11. Обе головки соединены трубкой 6 с длинной прорезью, которая закрывается вращающейся вокруг продольной оси ширмой; в соединительную трубку вкладывается кювета в виде узкой трубки, заполняемая водным раствором сахара.

Рисунок 4 – Круговой поляриметр

В поляриметрах указанных выше разновидностей используется принцип уравнивания освещенности разделенного на три (или две) части поля зрения. Его разделение осуществляется в круговом поляриметре благодаря введению в оптическую систему кварцевой пластинки, которая занимает среднюю часть поля зрения. Пластика эта может быть вырезана перпендикулярно оптической оси кристалла кварца, тогда в ней не будет происходить двойного лучепреломления, а будет иметь место вращение плоскости поляризации (кварц - оптически активное вещество). Толщина пластинки берется такой, чтобы плоскость поляризации входящего в нее света поворачивалась на $5-7^\circ$. Уравнивание освещенности частей поля зрения нужно проводить вблизи полного затемнения крайних и средней частей поля зрения, т.е. вблизи положения скрещивания поляризатора и анализатора ($\varphi = 86-87^\circ$), – такое положение анализатора называется чувствительным. Уравнивания освещенности частей поля зрения (фотометрического равновесия) можно достигать и при почти параллельном положении плоскостей пропускания поляризатора и анализатора ($\varphi = 3-4^\circ$), но при этом точность измерений уменьшается примерно на порядок.

Свет от лампы накаливания, пройдя через конденсор 11 и поляризатор 9, затем средней частью выделенного пучка проходит через кварцевую пластинку 10, защитное стекло (оно является также светофильтром) и анализатор 3. Крайние части пучка проходят только через защитное стекло и анализатор (рисунок 5); рисунок выполнен при условии, что кювета с раствором сахара в приборе отсутствует).



1. Естественный свет
2. Плоскость пропускания поляризатора
3. Положение векторов E в пучке света, вышедшем из поляризатора.
4. Кварцевая пластинка
5. Положение векторов E в свете после кварцевой пластинки
6. Положения плоскостей пропускания анализатора (a, b, c) и соответствующие им поля зрения (a', b', c').

Рисунок 5 – Объяснение возникновения тройного (или двойного) поля зрения в поляриметре

Если плоскость пропускания анализатора перпендикулярна плоскости пропускания поляризатора, то крайние части поля зрения максимально затемнены, а средняя является светлой. Если же плоскость пропускания анализатора перпендикулярна направлению вектора **E** в средней части пучка, в которой свет проходит через кварцевую пластинку, то темной является средняя часть поля зрения. Но если плоскость пропускания анализатора перпендикулярна к биссектрисе угла между направлениями вектора **E** в средней и в крайних частях светового пучка (*F*, *H*), то все части поля зрения будут иметь одинаковую (малую) яркость, и границы между ними почти не будут видны. Вводя между анализатором и поляризатором кювету с оптически активным раствором сахара, мы нарушаем фотометрическое равновесие. Восстановить его можно, повернув анализатор на угол, равный углу поворота плоскости поляризации света раствором сахара. Определив угол между начальным ("нулевым") и новым положением анализатора, мы можем узнать угол поворота поляризации оптически активным веществом. На лимбе I (рисунок 4) нанесена по часовой стрелке градусная шкала от 0° до 360°. Внутри лимба на подвижном диске, связанном с анализатором, нанесены два нониуса, расположенные диаметрально противоположно; нониусы имеют по двадцать делений и позволяют измерять углы с точностью 0,05. Если нуль нониуса не совпадает с каким-либо штрихом на шкале лимба, то, заметив какой штрих нониуса совпадает с градусным штрихом лимба, можно определить, сколько десятых и сотых долей градуса надо прибавить к целому числу градусов, показываемых нулевым штрихом нониуса. Например, нулевой штрих нониуса находится между 33° и 34°, а совпадает с некоторым штрихом лимба девятый штрих нониуса (первый после штриха с цифрой 4). Тогда "нулевое" положение анализатора будет таким: $33^{\circ} + 9 \cdot 0,05^{\circ} = 33,45^{\circ}$.



Рисунок 6 — Портативный поляриметр

На рисунке 6 приведен портативный поляриметр. Головка анализатора 3 портативного поляриметра состоит из зрительной трубки, неподвижного лимба с градусной шкалой и совместно вращающихся анализатора, нониуса и

отсчётной лупы 5. Головка анализатора связана с поляризационным устройством соединительной трубкой 2, в широкий разрез которой вставляется трубка с раствором 6. На соединительной трубке внизу крепится зеркало в оправе. Как анализатор, так и поляризатор представляют собой поляроидные пленки, заключенные между двумя защитными стеклами. В поляризационное устройство входят также оранжевый светофильтр и кварцевая пластинка, имеющая вид полукруга; она занимает половину поля зрения. Кварцевая пластинка поворачивает плоскость поляризации вступающего в неё света на $4-5^\circ$ и тем самым делит поле зрения на две различно освещенные части. На неподвижном лимбе вправо и влево от нуля нанесены 20 делений; цена деления лимба 1° . В плоскости лимба на подвижной втулке имеются два нониуса - левый и правый; каждый нониус разделен на 10 делений. Максимальное значение величины отсчёта по нониусу – $0,1^\circ$

Ход работы

1. Включить в сеть осветитель. Перемещением осветителя или прибора добиться равномерного освещения поля зрения (его частей) при удалённой из кюветного отделения трубки с раствором. Перемещением муфты (или оправы окуляра) установить окуляр на резкое изображение границы поля зрения. После этого вращением той же муфты (или кольца) повернуть анализатор до установления фотометрического равновесия в чувствительном положении (т.е. при минимальной общей освещенности поля зрения).
2. Установку прибора на фотометрическое равновесие произвести не менее 5 раз. Отсчеты по лимбу и нониусу занести в таблицу. Средняя величина φ_0 и является нулевым отсчетом прибора. Если нулевой штрих нониуса при достижении фотометрического равновесия оказывается при использовании портативного поляриметра смещенным относительно нулевого штриха лимба по часовой стрелке, то нулевому отсчету приписывается знак "плюс", если же против часовой стрелки, то знак "минус". Знак нулевого отсчета затем учитывается при определении угла поворота плоскости поляризации.
3. Определить среднее значение нулевого отсчета и среднее значение абсолютной погрешности.
4. Поместить трубку с раствором сахара в кюветное отделение соединительной трубки, закрыть шторку (при использовании кругового поляриметра). При этом происходит нарушение фотометрического равновесия. Установить окуляр по глазу на резкое изображение границ.
5. Поворотом анализатора восстановить фотометрическое равновесие. Пять раз произвести отсчет угла φ' ; рассчитать его среднее значение, а затем абсолютные погрешности и их среднее значение.
6. Определить угол поворота плоскости поляризации:

$$\varphi = \bar{\varphi}' - \bar{\varphi}_0$$

7. Оценить абсолютную погрешность определения этого угла:

$$\Delta\varphi = \bar{\Delta\varphi}' + \bar{\Delta\varphi}_0$$

8. Вычислить концентрацию C сахара в растворе по формуле закона Био

$$\varphi = [\alpha]Cl$$

9. Рассчитать относительную и абсолютную погрешности определения концентрации сахара в растворе:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta\varphi}{\varphi} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta[\alpha]}{[\alpha]} \text{ и } \Delta C = \varepsilon_c \bar{C}$$

Для сахара $[\alpha] = 0,665$ град·м²/кг при 293 К; $\Delta[\alpha] = 0,001$ град·м²/кг; длина трубки с раствором в круговом поляриметре 200 мм, в портативном поляриметре - 95 мм; $\Delta l = 1$ мм.

10. Запишите данные в таблицу и окончательный результат:

$$(C = \bar{C} \pm \Delta C)$$

Таблица

№	Знак поправки	Число делений лимба/нониуса	φ_0	$\Delta\varphi_0$	φ'	$\Delta\varphi'$	φ	$\Delta\varphi$	ε_0	$\bar{C}$	ΔC
1											
2											
3											

Средние значе-	φ_0	$\Delta\varphi_0$	φ'	$\Delta\varphi'$

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются друг от друга естественный и плоско-поляризованный свет?
2. Что такое оптическая активность вещества? Сформулируйте законы Био для явления вращения плоскости поляризации.
3. Сформулируйте и запишите закон Малюса. Для объяснения каких фактов этот закон используется в работе?
4. Перечислите основные части поляриметра, укажите их назначение.
5. Каково назначение кварцевой пластинки в поляриметре? Объясните, как надо установить анализатор для получения фотометрического равновесия.

Список использованной литературы:

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 1. Механика. Молекулярная физика : учебник для вузов / И. В. Савельев. – 18-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 436 с. – ISBN 978-5-507-52151-7. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/440105>.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебник для вузов / И. В. Савельев. – 18-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 500 с. – ISBN 978-5-507-51528-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/422636>.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : учебник для вузов / И. В. Савельев. – 16-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 320 с. – ISBN 978-5-507-50503-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/440198>.
4. Электронная библиотека ФГБОУ ВО «АГТУ» : сайт. – URL: <https://library.astu.org>. – Текст : электронный.
5. Образовательный портал ФГБОУ ВО «АГТУ» : Moodle : сайт. – URL: <portal.astu.org>. – Текст : электронный.
6. Работа с Яндекс-диск. – Текст : электронный // Яндекс : сайт. – URL: yandex.ru/support/disk/.
7. Научные журналы открытого доступа. – Текст : электронный // Научная электронная библиотека «eLibrary.ru» : сайт. – URL: <http://elibrary.ru>.