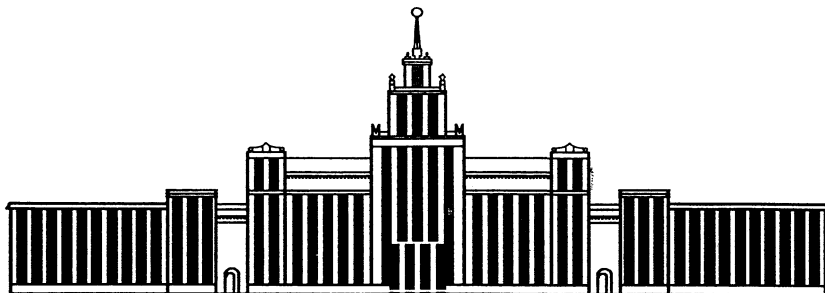


---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---



---

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

535(07)  
Ф-503

А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов, Г.П. Пызин,  
Т.Н. Хоменко, А.Е. Чудаков

## **ФИЗИКА. ОПТИКА**

Учебное пособие к выполнению лабораторных работ

---

Челябинск  
2016

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Общая и теоретическая физика»

535(07)  
Ф-503

А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов, Г.П. Пызин,  
Т.Н. Хоменко, А.Е. Чудаков

## **ФИЗИКА. ОПТИКА**

Учебное пособие  
к выполнению лабораторных работ

Под редакцией Л.Ф. Гладковой

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2016

УДК 535(075.8)  
Ф-503

Одобрено  
объединенным научно-методическим советом университета  
по физике

Рецензенты:  
*Л.А. Песин, С.В. Таскаев*

Авторский коллектив:  
А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов, Г.П. Пызин, Т.Н.Хоменко, А.Е.Чудаков

**Физика. Оптика:** учебное пособие к выполнению лабораторных работ / А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов, Г.П. Пызин и др., под ред. Л.Ф. Гладковой. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 55 с.

Учебное пособие предназначено для самостоятельной подготовки к выполнению лабораторных работ и составлению отчета по работе. Даны описания установок, методов измерений и рекомендации по представлению и обработке результатов физического эксперимента. Внимание студентов обращается на физические основы и анализ условий эксперимента, извлечение из опыта информации о физических явлениях и их закономерностях. Приведены вопросы для контроля знаний при подготовке к работе.

УДК 535(075.8)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные правила техники безопасности . . . . .	4
Правила проведения эксперимента . . . . .	4
Библиографический список . . . . .	4
Отчет по лабораторной работе . . . . .	5
Работа № 1. Изучение дисперсии света . . . . .	6
Работа № 2. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона . . . . .	9
Работа № 3. Исследование зависимости показателя преломления воздуха от давления с помощью интерферометра . . . . .	15
Работа № 4. Изучение явлений, обусловленных дифракцией . . . . .	20
Работа № 5. Изучение поляризации света . . . . .	25
Работа № 6. Изучение законов теплового излучения . . . . .	31
Работа № 7. Исследование характеристик вакуумного фотоэлемента . . . . .	37
Работа № 8. Изучение спектров испускания . . . . .	42
Приложения	
Приложение 1. Графическое представление и обработка результатов измерений	
1.1. Построение графиков . . . . .	47
1.2. Графический анализ опытных данных	
1.2.1. Сравнение с теорией. Функциональные шкалы . . . . .	48
1.2.2. Определение параметров линейной зависимости . . . . .	48
Приближенный метод . . . . .	48
Метод наименьших квадратов . . . . .	50
Приложение 2. Статистическая обработка результатов измерений	
2.1. Прямые измерения . . . . .	52
2.2. Косвенные измерения . . . . .	53
Приложение 3. Основные физические постоянные . . . . .	55

## **ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. К самостоятельному выполнению лабораторных работ студент может приступить после прохождения инструктажа по проведению лабораторных работ и усвоения безопасных методов их выполнения (о чем студент расписывается в журнале по технике безопасности).

2. Перед выполнением работы необходимо тщательно изучить описание лабораторной работы.

3. Работы следует выполнять на исправных установках.

4. Измерительные приборы и инструмент необходимо использовать только по их прямому назначению.

5. Включать приборы и лабораторные установки можно лишь после разрешения преподавателя.

6. Не следует допускать прямого попадания светового луча в глаза, особенно при использовании ртутной лампы.

## **ПРАВИЛА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

1. Данные измерений и расчетов следует записывать четко и кратко в заранее подготовленные таблицы.

2. Точность измерений и расчетов должна соответствовать цели опыта.

3. В каждом опыте необходимо устранять возможные систематические погрешности, оценивать случайные погрешности и точность результата измерений.

4. Результаты каждого эксперимента следует проанализировать и сделать выводы.

## **Библиографический список**

### **Основной**

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.– М.: Высш. школа, 1989. – 608 с.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – 542 с.

3. Методические указания к обработке результатов лабораторных измерений. – Челябинск: ЧПИ, 1982.– 48 с. (Шифр 530 (07) П 752).

### **Дополнительный**

4. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая – Л.: Энергоатомиздат, 1990.– 288 с.

5. Шелест, А.Е. Микрокалькуляторы в физике / А.Е.Шелест.– М.: Наука, 1988.– 272 с.

## ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Каждый студент оформляет отчет по индивидуальным опытным данным. Отчет выполняется в соответствии со стандартом СТП ЧПИ 05-87 "Лабораторные работы. Общие требования к оформлению отчета", который имеется в отделе нормативно-технической документации библиотеки.

Титульный лист оформляют так, как показано на образце.

ЮУрГУ

Кафедра общей и теоретической физики

Отчет

по лабораторной работе N 3

«Исследование зависимости показателя преломления воздуха от давления с помощью интерферометра»

Выполнил

студент группы ММ-223

Лебедев М.С.

*(Ф.И.О. студента, в именительном падеже)*

12.09.2014.

(дата выполнения работы, а не отчета)

Проверил

\_\_\_\_\_ (ФИО преподавателя)

Отчет содержит следующие разделы.

1. ЦЕЛЬ работы (дана в описании каждой работы или занятия).
  2. СХЕМА УСТАНОВКИ принципиальная, с необходимыми пояснениями.
  3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ с пояснением величин.
  4. ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ (в таблицах).
  5. ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.
  6. ГРАФИКИ, построенные на миллиметровой бумаге.
  7. ВЫВОД - это краткое заключение о результатах работы.
- Вывод включает в себя основные результаты измерений и их анализ:
- 1) сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими,
  - 2) сравнение полученных экспериментальных значений с табличными,
  - 3) сопоставление их расхождений с точностью измерений,
  - 4) анализ метода измерений и установки.

## Работа № 1

### ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СВЕТА

**ЦЕЛЬ:** исследовать зависимость оптической силы линзы и коэффициента преломления стекла от длины волны исследуемого света

**ОБОРУДОВАНИЕ:** источник света, набор светофильтров, исследуемая линза, матовая стеклянная пластина (экран), зачерненная стеклянная пластина (предмет), линейка.

#### В в е д е н и е

**Дисперсия света** – зависимость показателя преломления света в веществе от длины волны света. Следствие дисперсии света – разложение в спектр пучка белого света при прохождении его сквозь призму. Хроматизм положения изображения является одним из серьезных недостатков оптических систем (рис. 1).

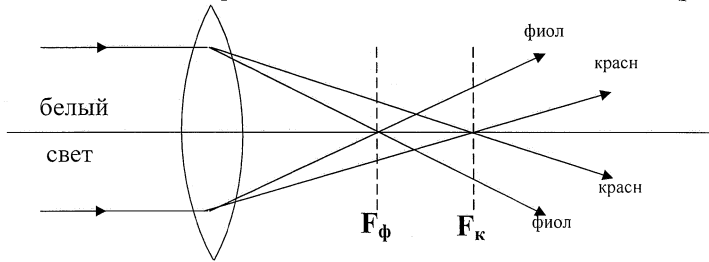
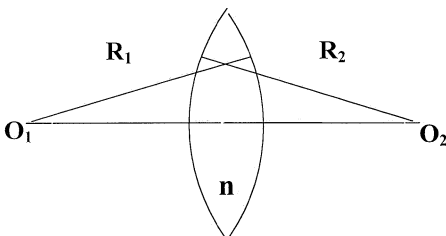


Рис. 1. Хроматизм положения изображения

Это значит, что нехроматический пучок имеет совокупность фокусов, расположенных вдоль оптической оси. Или, другими словами, линза дает ряд четких изображений предмета, расположенных на разных расстояниях от линзы, если изображения предмета получают в нехроматическом свете.

**Оптическая сила** тонкой линзы связана с показателем преломления  $n$  материала из которого изготовлена линза и радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  поверхностей линзы (рис. 2).



$$D = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

Рис. 2. Схематическое изображение линзы

Таким образом, определяя экспериментально оптическую силу линзы для различных частей оптического спектра, можно исследовать зависимость показателя преломления от длины волны света (дисперсию).

Оптическую силу линзы достаточно просто рассчитать по положению изображения  $H$ , получаемого с помощью линзы (рис. 3) от предмета  $h$ .

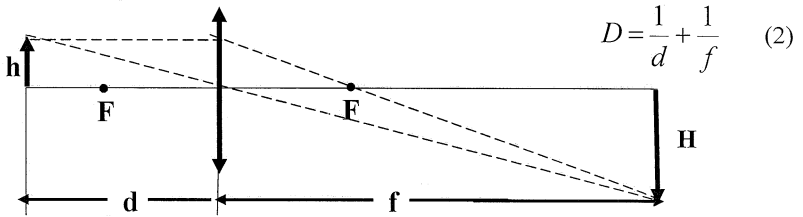


Рис. 3. Построение изображения в тонкой линзе

#### Описание установки

Оптическая система установки изображена на рис. 4

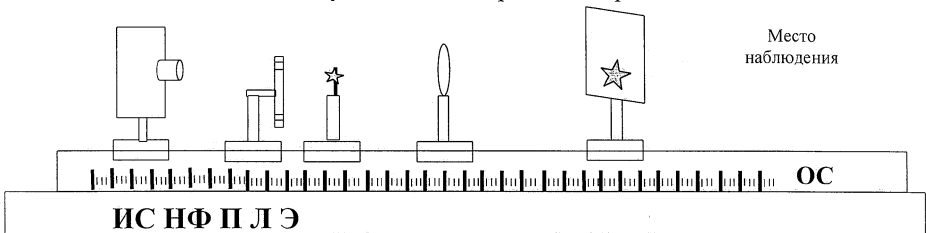


Рис. 4. Схема установки

- ОС – оптическая скамья;
- ИС – источник белого света;
- Ф – набор светофильтров;
- П – зачерненная стеклянная пластина (предмет);
- Л – исследуемая линза,
- Э – матовая стеклянная пластина (экран).

Если на оптической скамье расположить на определенном расстоянии  $d$  (больше  $F$ ) от линзы предмет, то перемещая экран вдоль скамьи, можно получить его четкое изображение.

#### П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

##### *Выполнение измерений*

1. Установите исследуемую линзу на заданное преподавателем расстояние от предмета  $d$  и закрепите ее. Запишите в таблицу указанные на установке значения радиусов кривизны поверхностей линзы и пропускаемые светофильтрами длины волн  $\lambda$ .
2. Установите плоскость пластин экрана и предмета перпендикулярно оптической оси линзы.
3. Установите в рабочее положение красный светофильтр.
4. Перемещая экран вдоль оптической скамьи, подберите такое его положение, при котором на экране получается самое четкое изображение предмета.



Таблица

$R_1=$ м; $R_2=$ м; $d=$ м					
$\lambda$	№	$f$	$D$	$D_{\text{ср}}$	$n$
$\lambda_{\text{к}} =$ НМ	1				
	2				
	3				
$\lambda_{\text{з}} =$ НМ	1				
	2				
	3				
$\lambda_{\text{с}} =$ НМ	1				
	2				
	3				

5. С помощью линейки измерьте расстояние  $f$  (см. рис. 3) и запишите его в таблицу.

6. Не меняя положение предмета и линзы, перемещая только экран, получите четкое изображение предмета сначала для зеленого, а затем и для синего светофильтра. Для каждого фильтра измерьте расстояния  $f$  и запишите его в таблицу.

7. Для увеличения точности повторите измерения дважды (пункт 3-6).

#### Обработка результатов измерений

1. Для каждого светофильтра рассчитайте оптическую силу линзы  $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ , найдите ее среднее значение  $D_{\text{ср}}$ .

2. Рассчитайте по формуле 1 показатель преломления стекла  $n$  для каждого фильтра, постройте график зависимости показателя преломления от длины волны.

3. В выводе по работе проанализируйте зависимость оптической силы линзы и показателя преломления от длины волны.

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Что представляет собой свет?
2. Что называется линзой? Напишите ее основные формулы?
3. Какая линза называется тонкой? Укажите основные ее характеристики?
4. Сформулируйте правила построения изображений в тонких линзах?
5. Какое явление называется дисперсией? В чем оно проявляется?

#### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.– М.: Высш. школа, 1989. – § 33.4.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – § 166–167.

## Работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**ЦЕЛЬ:** ознакомление с явлением интерференции, условием образования полос равной толщины (колец Ньютона) и с практическим использованием явления интерференции.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** микроскоп, линза и стеклянная пластина в металлическом корпусе, осветитель, набор светофильтров.

#### В в е д е н и е

Свет представляет собой электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом как цветное ощущение. Человеческий глаз воспринимает электромагнитные волны в интервале длин волн от 400 до 700 нм. Обычно, кроме *видимой части спектра*, в понятие *свет* включают две примыкающие области спектра электромагнитных волн – *инфракрасную* и *ультрафиолетовую*.

Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси  $x$ , описывается уравнениями

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx);$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kx),$$

где  $E_0$  и  $H_0$  – амплитуды напряженности электрического и магнитного полей,  $\omega t - kx$  – фаза волны,  $\omega$  – циклическая частота,  $k$  – волновое число ( $k=2\pi/\lambda$ ),  $\lambda$  – длина волны.

Поскольку физиологическое, фотохимическое и фотоэлектрическое действия света вызываются колебаниями электрического поля, то принято рассматривать колебания вектора  $\vec{E}$ , который называют световым.

При наложении двух или нескольких световых волн друг на друга наблюдается усиление света в одних точках пространства и ослабление в других. Это явление называется *интерференцией* света. Устойчивую картину могут дать только *когерентные волны*, то есть такие, которые имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз. Для получения контрастной интерференционной картины необходимо также, чтобы их интенсивности были соизмеримы и плоскости колебаний вектора  $\vec{E}$  совпадали.

Когерентные волны получают путем разделения на две части волны, излучаемой одним источником. Эти волны, прежде чем попадут в данную точку пространства, проходят различные расстояния (или одинаковое, но в средах с различными показателями преломления), поэтому между ними возникает постоянная разность фаз, и они дают интерференционную картину. Квадрат амплитуды  $E_0$  результирующего колебания, полученного при наложении двух волн,

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Интенсивность результирующей волны пропорциональна квадрату амплитуды:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

и зависит от разности фаз колебаний ( $\varphi_2 - \varphi_1$ ).

Если разность фаз  $\Delta\varphi$  в данной точке пространства равна четному числу  $\pi$ , то в этом месте происходит усиление колебаний (максимум освещенности), если же разность фаз равна нечетному числу  $\pi$ , то будет наблюдаться ослабление колебаний (минимум освещенности).

Оптическая разность хода лучей  $\Delta y$  связана с разностью фаз  $\Delta\varphi$  соотношением

$$\Delta y = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi. \quad (1)$$

Тогда условие максимума

$$\Delta y = m\lambda, \quad (2)$$

а условие минимума

$$\Delta y = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядок максимума (минимума).

### М е т о д   и з м е р е н и й

Один из способов получения интерференционной картины был предложен *И. Ньютоном*. На стеклянную пластину помещают стеклянную линзу с большим радиусом кривизны  $R$  (рис. 1). Между ними образуется тонкая воздушная прослойка переменной толщины  $d$  (оптический клин). На плоскую грань линзы направляют нормально монохроматический свет; луч, отражаясь от верхней и от нижней границе клина, разделяется на два когерентных луча.

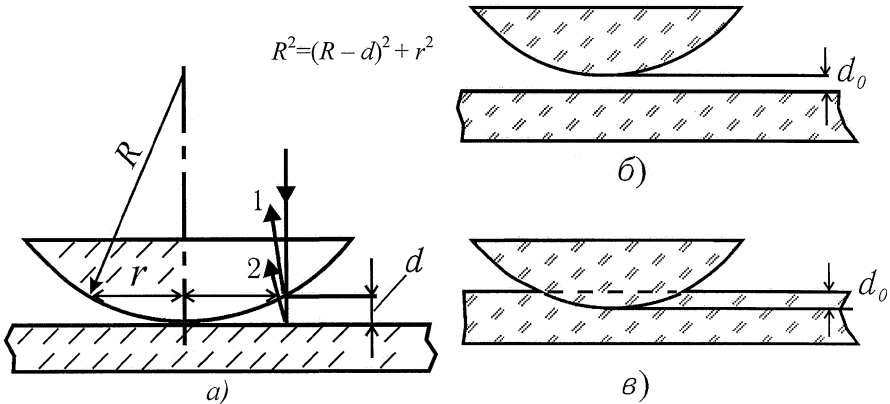


Рис. 1. Линза и пластина для получения колец Ньютона:  
а – идеальный случай; б и в – реальные случаи

Оптическая разность хода этих лучей

$$\Delta y = 2dn + \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

где  $n$  – показатель преломления среды, заполняющей пространство между линзой и стеклянной пластиной.

В данном случае  $n=1$ , так как средой является воздух, а дополнительная разность хода  $\frac{\lambda}{2}$  вводится, чтобы учесть изменение фазы волны на  $\pi$  при отражении света от оптически более плотной среды – стекла.

Как видно из формулы (4), оптическая разность хода лучей зависит от толщины  $d$  оптического клина. Геометрическим местом одинаковой толщины являются окружности, поэтому интерференционная картина имеет вид колец; их называют кольцами Ньютона. Это – частный случай *полос равной толщины*.

Кольца Ньютона можно наблюдать и в проходящем свете, но там, где в отраженном свете наблюдались темные полосы, в проходящем будут светлые и наоборот.

Радиус кольца  $r$  (рис.1) можно геометрически связать через толщину воздушного клина  $d$  и радиус кривизны линзы  $R$ :  $R^2=(R-d)^2+r^2$ , откуда

$$r^2 = 2Rd. \quad (5)$$

Заменяя в этом выражении  $d$  через  $\Delta u$ , согласно (4), и учитывая условия (2) и (3), получим радиусы темных  $r_T$  и радиусы светлых  $r_C$  колец:

$$r_T^2 = 2m \frac{\lambda}{2} R, \quad (6)$$

$$r_C^2 = (2m+1) \frac{\lambda}{2} R. \quad (7)$$

По любой из этих формул можно определить радиус кривизны линзы. Однако практически трудно создать идеальный точечный контакт линзы с пластиной: обычно на месте контакта имеется дополнительный зазор  $d_0$ , или же тела в месте контакта деформированы. В этих случаях к разности хода  $\Delta u$  необходимо добавить (см. рис. 1б), либо вычесть (см. рис. 1в) дополнительную разность хода  $2d_0$ . С учетом этого формула (6) для темных колец будет иметь вид

$$r_T^2 = m\lambda R \pm 2d_0 R. \quad (8)$$

Как видно из уравнения (8), зависимость  $r^2$  от номера кольца  $m$  является линейной с угловым коэффициентом

$$K = \lambda R. \quad (9)$$

Эта формула позволяет определить радиус кривизны линзы при известной длине волны  $\lambda$ .

Точка пересечения прямой с осью ординат дает

$$b = 2d_0 R.$$

## О п и с а н и е   у с т а н о в к и

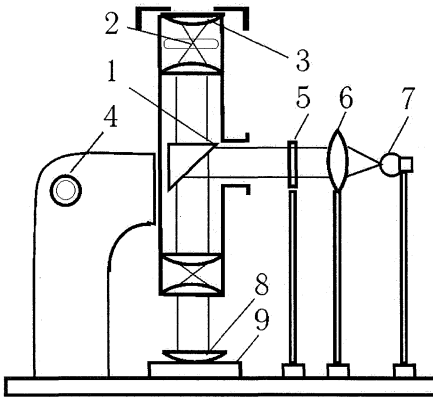


Рис. 2. Схема установки:

- 1 – призма с полупрозрачной гранью;
- 2 – микрометрическая шкала;
- 3 – линза окуляра;
- 4 – винт для перемещения тубуса;
- 5 – светофильтр;
- 6 – собирающая линза;
- 7 – источник света;
- 8 – исследуемая линза;
- 9 – стеклянная пластина.

На столик микроскопа (рис. 2) помещают стеклянную пластину и исследуемую линзу (в лабораторной установке они заключены в металлический корпус). Внутри тубуса микроскопа находится полупрозрачная стеклянная призма 1, наклоненная к оси микроскопа под углом  $45^{\circ}$ . Свет от источника 7, пройдя собирающую линзу 6 и отражаясь от призмы 1, падает нормально на исследуемую линзу. Для получения монохроматического света используется светофильтр 5.

Кольца Ньютона рассматривают через микроскоп в отраженном свете. Число наблюдаемых колец и их четкость зависят от качества светофильтра:

чем ближе пропускаемый свет к монохроматическому, тем больше колец можно видеть. Измеряют радиусы колец с помощью окулярного микрометра, представляющего собой стеклянную пластину с делениями. Шкалу микрометра совмещают с изображением колец Ньютона по их диаметру, что позволяет видеть одновременно и деления шкалы, и кольца (рис. 3). Например, в данном случае отметками первого темного кольца будут 32 и 56 малых делений.

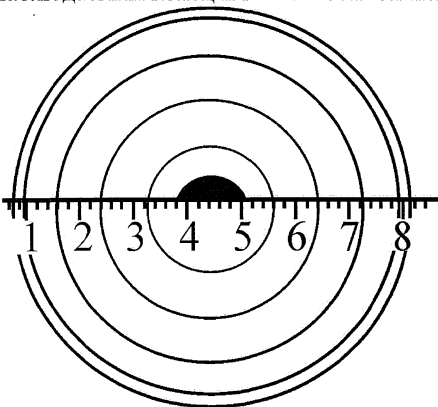


Рис. 3. Вид колец Ньютона и шкалы микрометра (отметки первого темного кольца: левый край - 32 и правый край - 56 малых делений)

# П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

## Выполнение измерений

1. Включите источник света 7.
2. Проверьте коэффициент увеличения микроскопа. Должно быть установлено значение 7. Этому значению соответствует коэффициент увеличения  $\beta=1,38 \cdot 10^{-2}$  мм/мал. дел.
3. На пути светового луча установите светофильтр по заданию преподавателя. Длину волны света  $\lambda$ , указанную на светофильтре, запишите в таблицу.
4. В поле зрения микроскопа должны появиться кольца Ньютона (см. рис. 3). Слегка передвигая пластину и линзу в металлическом корпусе, расположите кольца так, чтобы их диаметр совпал со шкалой микроскопа.
5. Измерьте в *малых* делениях шкалы микроскопа (см. рис. 3) координаты левого края первого от центра темного кольца, при этом центральное темное пятно не учитывается, и запишите результат в таблицу.
6. Продолжите измерения п. 5 для второго и последующих темных колец.
7. Повторите измерения п. 5-6 для правого края темных колец.

Таблица

Цвет светофильтра _____ $\lambda=( \quad \pm \quad )$ нм; $\beta=1,38 \cdot 10^{-2}$ мм/ малое деление									
Номер кольца $m$		1	2	3	4	5	6		7
Числовые отметки колец Ньютона	слева								
	справа								
Диаметр кольца $D$ , мал. дел.									
Радиус кольца $r$ , мал. дел.									
Радиус кольца $r = r \beta$ , мм									
$r^2$ , мм <sup>2</sup>									
								Среднее	

## Обработка результатов измерений

1. Вычислите диаметр колец и их радиусы в малых делениях, радиусы колец в миллиметрах, используя коэффициент увеличения  $\beta$ :  $r$  (мм) =  $\beta r$  (дел.).
2. Постройте график зависимости квадрата радиуса кольца от его номера; так как он будет линейным, используя один из методов, описанных в приложении 1, найдите параметры зависимости (8):  $K=\lambda R$  и  $b$ .
3. Рассчитайте по формуле (9) средний радиус кривизны линзы  $R$ .
4. Оцените точность измерения величины  $R$  по формуле (14) приложения 2:

$$\delta_R = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_b^2},$$

где  $\delta_b = \Delta b / b$ , а  $\delta_K$  определяется по графику с помощью формулы (4) приложения 1.

5. В выводе по работе запишите результат измерений:  $R=$  ;  $\delta_R =$  , как пример практического использования интерференции.

## К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Что представляет собой свет?
2. Какое явление называют интерференцией волн?
3. Какие лучи дают устойчивую интерференционную картину?
4. Приведите примеры интерференции в природе, практического применения этого явления.
5. Дайте определение оптической разности хода световых лучей.
6. Как связана разность фаз с оптической разностью хода?
7. Выпишите условия максимума (минимума) при интерференции.
8. В чем состоит способ получения интерференционной картины, предложенной Ньютоном?
9. Можно ли получить светлое пятно в центре интерференционной картины в *отраженном* свете?
10. Покажите, как с помощью колец Ньютона можно определить радиус кривизны  $R$  линзы.
11. Как можно определить длину волны монохроматического света  $\lambda$  при помощи колец Ньютона?

## Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. школа, 1989. – § 31.1–31.3 .
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – § 171–175.

### Работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

**ЦЕЛЬ:** ознакомление с работой интерферометра и определение с его помощью показателя преломления воздуха.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** интерферометр ШХ-5, цифровой и водяной манометр, помпа.

### В в е д е н и е

*Абсолютный показатель преломления вещества* есть отношение скорости распространения света в вакууме к скорости распространения света  $v$  в веществе:  $n=c/v$ . Согласно электромагнитной теории Максвелла показатель преломления вещества связан с диэлектрической  $\epsilon_\chi$  и магнитной  $\mu_\chi$  проницаемостями среды:  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Так как  $\mu \approx 1$  для всех неферромагнитных прозрачных сред, то для них  $n = \sqrt{\epsilon}$ .

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика определяется свойствами и концентрацией  $n_0$  молекул, входящих в его состав

$$\epsilon = 1 + \chi = 1 + \alpha n_0, \quad (1)$$

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика,

$\alpha$  – поляризуемость молекулы (величина, которая характеризует способность молекулы вещества поляризоваться под действием внешнего поля).

Таким образом, учитывая, что концентрация  $n_0$  связана с давлением соотношением  $p=n_0kT$ , получаем

$$n = \sqrt{1 + \alpha n_0} = \sqrt{1 + \frac{\alpha p}{kT}}. \quad (2)$$

Для газов величина  $\frac{\alpha p}{kT} \ll 1$ , поэтому, разложив выражение (2) в ряд, получим

$$n = 1 + \frac{\alpha}{2kT} \cdot p, \quad (3)$$

где  $T$  – температура газа;

$k$  – постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

### М е т о д и з м е р е н и й

Показатель преломления воздуха при изменении давления изменяется незначительно. Одним из приборов, позволяющим заметить даже малые изменения, является *интерферометр* – прибор, в котором используется явление *интерференции света*. В интерферометре пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два (или более) когерентных луча, которые проходят различный *оптический путь*, а затем сводятся вместе и интерферируют.

Вид интерференционной картины зависит от способа разделения пучка света, размеров и спектрального состава источника света. Чаще всего это бывает ряд



чередующихся темных и светлых полос, цвет которых соответствует длине волны света  $\lambda$ .

Пусть один луч проходит геометрический путь  $l_1$  в среде с показателем преломления  $n_1$  а другой – путь  $l_2$  в среде с показателем преломления  $n_2$ , то оптическая разность хода лучей

$$\Delta y = l_1 n_1 - l_2 n_2 \quad \text{или} \quad \Delta y = l \Delta n \quad \text{при} \quad l_1 = l_2 = l. \quad (4)$$

Если  $\Delta y$  равно четному числу полувольт, то наблюдается максимум, если нечетному, то минимум освещенности. При изменении одного из показателей преломления ( $n_1$  или  $n_2$ )  $\Delta y$  будет изменяться. При изменении  $\Delta y$  на  $\lambda$  вся интерференционная картина сместится ровно на одну полосу, и картина окажется подобной прежней (если интенсивность света в полосах одинакова). Таким образом, между смещением интерференционной картины на  $m$  полос и изменением оптической разности хода на  $\Delta y$  существует соотношение

$$\Delta y = m\lambda, \quad \text{где} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что этот метод является весьма чувствительным. Так, при  $l_1 = l_2 = 1$  см смещение интерференционной картины на одну полосу соответствует изменению показателя преломления на  $\Delta n = 5 \cdot 10^{-5}$ . Современные интерферометры позволяют замечать смещение интерференционной картины на  $0,1 \dots 0,01$  интерференционной полосы.

Из уравнения (3) следует, что изменение давления газа на  $\Delta p$  приведет к изменению показателя преломления на величину  $\Delta n$ :

$$\Delta n = \frac{\alpha}{2kT} \cdot \Delta p. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет опытным путем определить величину поляризуемости молекулы газа  $\alpha$ , определяя параметры линейной зависимости

$$\Delta n = K \Delta p,$$

где угловой коэффициент

$$K = \frac{\alpha}{2kT}. \quad (7)$$

Затем, с помощью уравнения (3) можно вычислить значение показателя преломления  $n$  при давлении газа  $p$ , используя ту же величину  $K$ :

$$n = 1 + K p. \quad (8)$$

### О п и с а н и е у с т а н о в к и

В работе используется шахтный интерферометр ШХ-5, предназначенный для определения концентрации вредных газов в окружающей среде. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 1.

Свет от лампы осветителя  $S$  слабо расходящимся пучком падает на плоскопараллельную пластину  $\delta$ , которая разделяет каждый луч на два когерентных. Луч, отраженный от нижней грани пластины (на рис. 1 он показан сплошной линией), дважды проходит через полость  $\Pi$ , давление воздуха в которой может изменяться. Луч, отраженный от верхней грани пластины (пунктирная линия), выйдя из камеры, как и первый, вновь попадает на пластину  $\delta$ . Отразившись от верхней и нижней граней, лучи интерферируют.

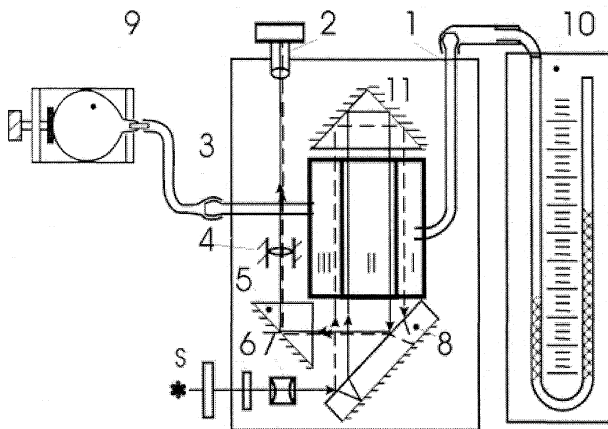


Рис. 1. Схема установки:  
 1 и 3 – штуцеры;  
 2 – окуляр;  
 4 – объективы;  
 5 – призма;  
 6 – светофильтр,  $\lambda=620 \pm 10$  нм;  
 7 – конденсор;  
 8 – плоскопараллельная пластина;  
 9 – помпа;  
 10 – манометр;  
 11 – призма;  
 S – лампа осветителя.

Интерференционная картина, возникающая в этом случае, представляет собой систему колец (*линии равного наклона*). В установке, применяемой в данной работе, рассматривается лишь малая часть интерференционной картины, представляющая собой ряд параллельных полос. Для перемещения картины служит ручка поворота призмы 11, расположенная на корпусе прибора.

Давление в полости II задают помпой, а измеряют электронным или водяным манометром. Если давление в полости II увеличить на величину  $\Delta p$ , то увеличится и показатель преломления воздуха на  $\Delta n$ . В результате, согласно выражению (4), оптическая разность хода лучей изменится на величину  $\Delta y = 2l\Delta n$ , где  $l = 50$  мм – длина полости II.

Это приведет к смещению наблюдаемой интерференционной картины на  $m$  полос, число которых может быть представлено с учетом формулы (5) как:

$$m = \frac{\Delta y}{\lambda} = \frac{2l\Delta n}{\lambda}. \tag{9}$$

В соответствии с выражением (9) найдем изменение показателя преломления воздуха при смещении интерференционной картины на  $m$  полос для интерферометра ШХ-15 с красным светофильтром ( $\lambda=620$  нм).

$$\Delta n = \frac{m \cdot \lambda}{2l} = (6,2 \cdot 10^{-6}) \cdot m \text{ (м)}. \tag{10}$$

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

### Выполнение измерений

1. Включите источник света.
2. Выкручивайте винт помпы до установления воды в обоих коленах манометра примерно на одном уровне. Показания электронного манометра должны быть равны нулю. При этом давление в полости II примерно будет равно атмосферному.
3. Вращением ручки интерферометра установите край темной полосы под нуль шкалы интерферометра.
4. При выполнении работы необходимо следить, чтобы вода в левом колене манометра не поднималась до максимума. Попадание воды в интерферометр может привести к выходу его из строя.
5. Закручивайте винт помпы и наблюдайте смещение интерференционной картины вдоль шкалы. Как только первая темная полоса подойдет к нулевой отметке интерферометра, запишите давление манометра в таблицу.
6. Продолжайте закручивать винт и при достижении каждой очередной темной полосы (второй, третьей и т.д.) нулевой отметки интерферометра записывайте в таблицу соответствующее изменение давления  $\Delta p$  (значение электронного манометра или разность уровней воды в манометре) в *миллиметрах водяного столба* в первую строку таблицы  $\Delta p_1$ .
7. После проведения пяти измерений ( $m=5$ ) или максимума подъема воды в правом колене верните установку в исходное положение п. 2.
8. Повторите опыт еще два раза, заполняя сначала строку  $\Delta p_2$ , а потом  $\Delta p_3$ .

Таблица

Смещение интерференционной картины, $m$ полос		1	2	3	4	5
Изменение давления, мм водяного столба	$\Delta p_1$					
	$\Delta p_2$					
	$\Delta p_3$					
	Среднее					
$\Delta p$ , Па						
$\Delta n$ , $10^{-6}$						

### Обработка результатов измерений

1. Найдите среднее значение  $\Delta p$  для каждого числа полос  $m$ .
2. Переведите измеренное давление в Па, 1 мм водяного столба равен 9,8 Па.
3. По формуле (10) вычислите изменения показателя преломления  $\Delta n$  и результаты запишите в таблицу.
4. Постройте график зависимости изменения показателя преломления от разности давлений.
5. Рассчитайте угловой коэффициент построенной прямой  $K$ .
6. Вычислите значение поляризуемости молекулы воздуха  $\alpha = K (2 kT)$ .

7.

8. Найдите показатель преломления воздуха  $n$  при комнатной температуре и давлении  $p=10^5$  Па, используя формулу (8):  $n = 1 + Kp$ .

9. Найдите относительную погрешность углового коэффициента  $\delta_K$  (см. приложение 1.2.2), которая определяет точность выполненных измерений  $n$  и  $\alpha$ .

10. Запишите результаты измерений: показатель преломления воздуха  $n$  и  $\delta_n$ ; поляризуемость молекулы  $\alpha$ .

11. Сравните полученное значение  $n$  воздуха с табличным значением  $n_{\text{табл}}=1,00029$ . Сделайте вывод о возможностях интерференционных методов, об их чувствительности к составу газа и о точности этих методов.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Каков физический смысл показателя преломления?

2. Как связан показатель преломления диэлектрика с его диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , восприимчивостью  $\chi$  диэлектрика и с поляризуемостью?

3. Как зависит показатель преломления воздуха от давления?

4. Каково устройство шахтного интерферометра? Как получают в нем когерентные лучи?

5. Что называется оптической разностью хода?

6. Как изменяют оптическую разность хода лучей в данной работе?

7. Как меняется наблюдаемая интерференционная картина при изменении оптической разности хода лучей?

### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. школа, 1989. – § 30.4; 31.1; 31.5.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – §170–172; 175.

## Работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДИФРАКЦИЕЙ

**ЦЕЛЬ:** наблюдение дифракции света на дифракционной решетке, определение длины волны света и периода дифракционной решетки.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** дифракционная решетка, щель, оптическая скамья, источники света (ртутная лампа, лампа накаливания), светофильтры.

#### В в е д е н и е

*Дифракцией* называется явление огибания волнами препятствий или проникновение света в область геометрической тени. Одним из наиболее распространенных приборов, в котором используется дифракция, является дифракционная решетка (ДР). ДР – это прибор, содержащий ряд параллельных, равноотстоящих и близко расположенных друг от друга щелей. Расстояние  $d$  между соседними щелями, равное сумме длин прозрачной  $a$  и непрозрачной  $b$  частей:  $d=a+b$ , называют *постоянной ДР* (рис. 1).

При падении плоской световой волны на ДР каждый элемент ее поверхности становится источником вторичных когерентных волн.

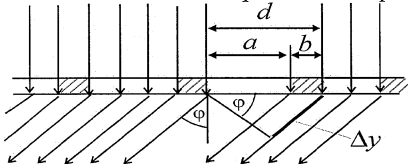


Рис. 1. Дифракционная решетка

Результирующее световое колебание в любой точке пространства определяется согласно *принципу Гюйгенса-Френеля* суммированием вторичных волн, приходящих в данную точку от всех элементов решетки, с учетом их амплитуд и фаз.

Если на пути волн за решеткой поставить собирающую линзу (рис. 2а), то в ее фокальной плоскости можно наблюдать дифракционную картину.

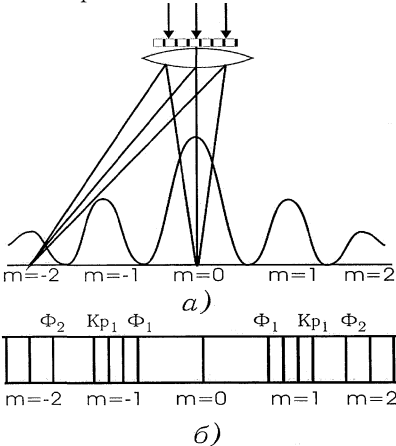


Рис. 2. Дифракция

Эту картину можно наблюдать непосредственно глазом, воспринимая лучи, прошедшие сквозь решетку. Роль линзы в этом случае играет хрусталик глаза.

Главные дифракционные *максимумы* возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода лучей, идущих от соседних щелей решетки, равна целому числу длин волн  $\lambda$ :

$$\Delta y = m \lambda.$$

Из рис. 1 видно, что оптическая разность хода лучей, идущих от двух соседних щелей под углом дифракции  $\varphi$ ,

$$\Delta y = d \sin \varphi. \quad (1)$$

## М е т о д   и з м е р е н и й

Таким образом, углы дифракции, под которыми наблюдаются максимумы, определяются условием

$$d \sin \varphi = m\lambda. \quad (2)$$

Здесь  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  – порядок дифракционного максимума. Из формулы (2) следует, что, если падающий свет содержит несколько различных длин волн, то решетка разложит его в спектр (рис. 2б).

В направлении начального распространения света в случае нормального падения ( $\varphi = 0$ ) возникает максимум нулевого порядка ( $m = 0$ ). Справа и слева от него располагаются сплошные или линейчатые спектры различных порядков ( $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ ). В каждом из спектров максимумы более коротких длин волн располагаются ближе к центральной полосе.

Если с помощью формулы (2) определяют постоянную ДР, используя монокроматическое излучение с известной длиной волны  $\lambda$ , то эту операцию называют градуировкой установки. После градуировки такую ДР с известным периодом  $d$  можно использовать в качестве спектрометра, то есть для измерения длин волн  $\lambda$  в неизвестном спектре, используя формулу (2).

### О п и с а н и е   у с т а н о в к и

Оптическая схема установки показана на рис. 3. Все элементы установки помещаются в стойках на оптической скамье.

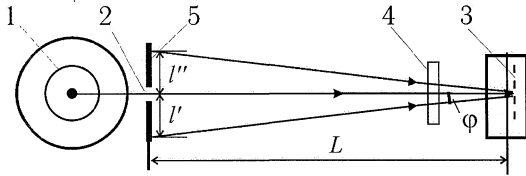


Рис. 3. Схема установки:

- 1 – источник света;
- 2 – щель;
- 3 – ДР;
- 4 – исследуемый светофильтр;
- 5 – экран.

Свет от источника 1, пройдя через щель 2, попадает на дифракционную решетку 3. Дифракционную картину наблюдают непосредственно глазом на экране 5. Максимум нулевого порядка (центральный) совпадает со щелью. По обе стороны от нее расположены главные максимумы первого, второго и других порядков. На экране находится отсчетная линейка. Из рис. 3 видно, что

$$\sin \varphi = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}}, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние от щели до максимума с углом дифракции  $\varphi$ ,  
 $L$  – расстояние от экрана до ДР.

Подставляя значение синуса в уравнение (2), получаем

$$\lambda = \frac{d \cdot l}{m\sqrt{L^2 + l^2}}. \quad (4)$$

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

### 1. Исследование линейчатого спектра (определение постоянной дифракционной решетки)

Задание выполняется на установке с ртутной лампой.

#### Выполнение измерений

1. Установите заданное преподавателем расстояние между дифракционной решеткой и экраном, запишите его в таблицу.

2. Включите ртутную лампу. Ртутная лампа сильно нагревается во время работы и повторное ее включение возможно только после остывания, что занимает достаточно длительное время, поэтому выключать лампу следует только после проверки преподавателем результатов данного задания.

3. Наблюдая через дифракционную решетку, покажите карандашом или ручкой на экране слева от щели расположение первой фиолетовой линии в спектре первого порядка (ближняя линия к щели). Измерьте по шкале расстояние  $l'$  от центрального максимума (щели) до фиолетовой линии в миллиметрах. Определите расположение фиолетовой линии справа от щели  $l''$ . Результаты запишите в табл. 1.

4. Проведите аналогичные измерения для других ярких линий спектра ртути, указанных в табл. 1, сначала для первого, а затем и для второго порядков.

Таблица 1

Расстояние от экрана до решетки $L =$ мм							
Цвет линии $\lambda$ , нм	Порядок спектра $m$	Отсчет по шкале		$l = \frac{l'' + l'}{2}$ , мм	$d_b$ мм	$(d_i - \bar{d})$ , мм	$(d_i - \bar{d})^2$ , мм <sup>2</sup>
		$l'$ , мм	$l''$ , мм				
1-я фиолетовая 405,6	1						
	2						
синяя (яркая) 435,8	1						
	2						
зеленая (яркая) 546,1	1						
	2						
1-я желтая 577,0	1						
	2						
красная 690,7	1						
	2						
				Среднее $\bar{d}$ :		Сумма:	

## Обработка результатов измерений

1. По полученным данным для каждой линии спектра рассчитайте среднее расстояние линии от центрального максимума  $l$  и постоянную дифракционной решетки  $d$ , используя формулу:

$$d = m \frac{\sqrt{L^2 + l^2}}{l} \lambda \quad (5)$$

2. Найдите среднее значение величины  $\bar{d}$ .

3. Рассчитайте доверительный интервал (см. приложение 2.1):

$$\Delta_d = \sigma_d t_{P,N},$$

где  $\sigma_d = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^2}{N(N-1)}}$  – среднее квадратичное отклонение;

$t_{P,N}$  – коэффициент Стьюдента при  $P=0,6$  для  $N$  выполненных измерений.

4. Запишите результат в виде  $d = \bar{d} \pm \Delta_d$  с указанием доверительной вероятности  $P$ .

5. Сделайте вывод.

### 2. Исследование светофильтра:

*определение области его прозрачности в видимой части спектра*

Задание выполняет на установке с лампой накаливания.

Часть сплошного спектра, для которой данный фильтр прозрачен, называют *областью прозрачности светофильтра* или *полосой пропускания*. Для определения области прозрачности светофильтра находят коротковолновую  $\lambda_K$  (начало спектра) и длинноволновую  $\lambda_D$  (окончание спектра) границы области (рис. 4).

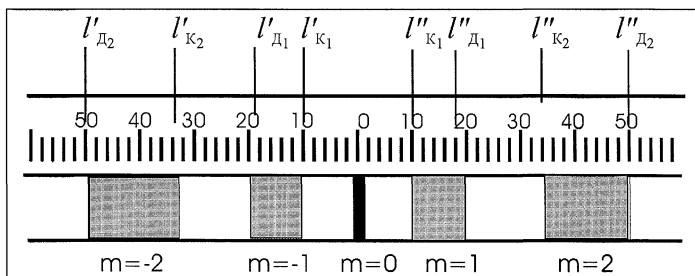


Рис. 4. Вид спектра лампы накаливания через светофильтр

### Выполнение измерений

1. Включите лампу накаливания.

2. Установите заданные преподавателем расстояние от экрана до дифракционной решетки и светофильтр. Запишите в табл. 2 это расстояние, цвет светофильтра и длину волны, пропускаемого им света.

3. В спектре первого порядка слева от центрального максимума определите положение коротковолновой границы пропускаемого светофильтром света  $l'$  (оно соответствует началу сплошного спектра ближнего к центральному максимуму см. рис. 4). Запишите его расположение на экране в миллиметрах в табл. 2.



Таблица 2

Расстояние от экрана до решетки $L =$ мм								
Цвет светофильтра				Длина волны $\lambda =$ нм				
Порядок спектра $m$	Граница области прозрачности							
	коротковолновая				длинноволновая			
	отсчет по шкале, мм		$\frac{l'+l''}{2}$ , мм	$\lambda_K$ , нм	отсчет по шкале, мм		$\frac{l'+l''}{2}$ , мм	$\lambda_D$ , нм
	влево $l'$	вправо $l''$			влево $l'$	вправо $l''$		
1								
2								
Среднее значение								

4. Определите положение коротковолновой границы справа от центрального максимума  $l''$ . Результаты измерений запишите в табл. 2.

5. Определите положение длинноволновой границы спектра (окончание сплошного спектра) слева  $l'$  и справа  $l''$ . Результаты запишите в табл. 2.

6. Повторите измерения п.п. 3 и 5 для спектра второго порядка (вторая светлая полоса на экране от центрального максимума). Результаты запишите в табл. 2.

#### Обработка результатов измерений

1. Найдите средние значения  $l$ .

2. По формуле (4) рассчитайте коротковолновые и длинноволновые границы спектра пропускания  $\lambda_K$  и  $\lambda_D$  для спектров первого и второго порядков. Найдите их средние значения.

3. Сделайте вывод, в котором сравните полученную Вами область прозрачности светофильтра с указанным значением длины волны.

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какое явление называется дифракцией света?
2. В чем заключается принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Каково условие максимума для ДР?
4. Запишите формулу, определяющую положение главных максимумов интенсивности света при дифракции на ДР.
5. Что такое порядок дифракционного спектра?
6. В чем отличие дифракционной картины при наблюдении в монохроматическом и белом свете?
7. Что называют областью прозрачностью фильтра?

#### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. школа, 1989. – § 32.1; 32.3–32.4.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – §176; 180.

## Работа № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

**ЦЕЛЬ:** исследование поляризации света при отражении от диэлектрика и при прохождении света через поляроиды, определение угла полной поляризации.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** источник света, поляризатор, набор стеклянных пластинок, фотоэлемент, вольтметр, линза.

#### В в е д е н и е

Из электромагнитной теории света следует, что световая волна является поперечной, то есть векторы напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  и скорости распространения света  $\vec{c}$  взаимно перпендикулярны. Свет от обычных источников состоит из множества цугов волн, световые векторы  $\vec{E}$  которых ориентированы случайным образом, а колебания различных направлений равновероятны. Такой свет называется *естественным*.

Свет, в котором направления колебаний каким-либо образом упорядочены, называется *поляризованным*, а процесс получения поляризованного света называется *поляризацией*. Если колебания вектора происходят в одной плоскости относительно луча, то свет считается *плоскополяризованным*. *Частично поляризованный* свет – это свет, в котором имеется преимущественное направление колебаний вектора  $\vec{E}$ . Эти случаи схематически показаны на рис.1, где луч перпендикулярен плоскости рисунка.

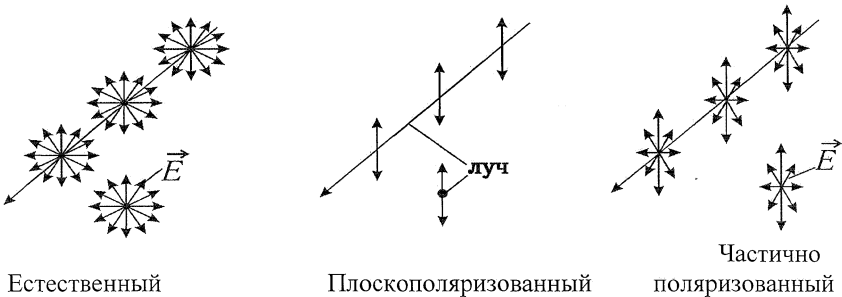


Рис. 1. Схематическое изображение поляризации света

Плоскость, которая содержит как сам луч света, так и вектор  $\vec{E}$ , называется *плоскостью поляризации*. Поляризация света наблюдается при отражении, преломлении света и при прохождении света через анизотропные вещества. Приборы для получения поляризованного света называются *поляризаторами*. Поляризованный свет нельзя отличить от неполяризованного визуально. Анализ поляризованного света делают с помощью поляризатора, через который пропускают исследуемый свет. В таких случаях поляризатор называют *анализатором*.

## М е т о д   и з м е р е н и й

Для явления поляризации справедливы следующие закономерности.

При отражении светового луча от поверхности изотропных диэлектриков, например, от поверхности стекла или воды, отраженный луч оказывается частично поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Степень поляризации отраженных лучей меняется при изменении угла падения. Отраженный луч будет *плоскополяризован* только в том случае, если угол падения имеет определенную величину  $\alpha_{Бр}$ , называемую углом полной поляризации. Теория и опыт показывают, что угол полной поляризации в этом случае удовлетворяет закону Брюстера

$$n = \operatorname{tg} \alpha_{Бр}, \quad (1)$$

где  $n$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Таким образом, определив в эксперименте угол  $\alpha_{Бр}$ , можно найти величину  $n$ .

2. Если на анализатор падает плоскополяризованный свет, плоскость поляризации которого составляет угол  $\varphi$  с плоскостью поляризации лучей, пропускаемых анализатором, то интенсивность пропущенного им света будет определяться *законом Малюса*:

$$I_A = I \cdot \cos^2 \varphi, \quad (2)$$

где  $I_A$  – интенсивность света, проходящего через анализатор,

$I$  – интенсивность света, падающего на анализатор.

3. Закон Малюса показывает возможность анализа характера и степени поляризации света. Если частично поляризованный свет пропускать через анализатор, то в зависимости от положения **плоскости поляризации анализатора (ППА)** будет изменяться интенсивность  $I_A$  прошедшего света. Она достигает максимального значения  $I_{\max}$  если ППА совпадает с плоскостью преимущественных колебаний частично поляризованного света. Если эти плоскости перпендикулярны друг другу, то интенсивность света, прошедшего через поляризатор, будет минимальной  $I_{\min}$ .

Для характеристики поляризованного света используют величину, называемую *степенью поляризации* света  $P$ ,

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3)$$

Очевидно, что  $0 \leq P \leq 1$ . Для естественного света  $P = 0$ , так как  $I_{\max} = I_{\min}$ , а для плоскополяризованного света  $P = 1$ , так как  $I_{\min} = 0$ .

## О п и с а н и е   у с т а н о в к и

Для изучения законов Брюстера и Малюса используется установка (рис. 2), которая собирается на оптической скамье.

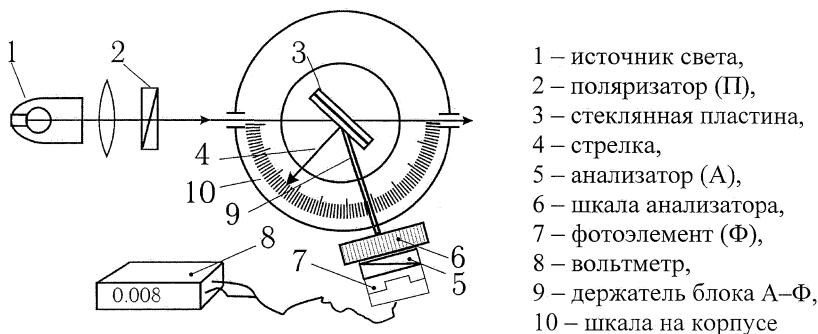


Рис. 2. Схема установки

Свет от источника света 1 падает на стеклянную пластину 3, помещенную в защитный корпус. Изменение угла падения света  $\alpha$  осуществляется поворотом держателя пластин. Красная стрелка на крышке держателя указывает угол падения света. К установке прилагается набор съемных стеклянных пластин, закрепленных в обоймы (по 2, 4, 7, 12 пластин). Отраженный от пластины частично поляризованный свет через анализатор попадает на фотоэлемент, подключенный к вольтметру. Показания вольтметра  $U = I_{\Phi} R$  пропорциональны интенсивности света, попадающего на фотоэлемент, так как фототок  $I_{\Phi}$  пропорционален световому потоку.

Положение плоскости поляризации анализатора отмечают по шкале 6 с помощью указателя. Блок “анализатор – фотоэлемент” (А–Ф) закреплен на держателе, который может поворачиваться вокруг вертикальной оси на угол от  $50^{\circ}$  до  $180^{\circ}$ .

Отражающую пластину 3 поворачивают вокруг вертикальной оси. Для отраженного от нее частично поляризованного света плоскость преимущественных колебаний вертикальна. Поэтому на фотоэлемент падает световой поток, зависящий от положения ППА: он будет максимальным (показание вольтметра максимально), если ППА вертикальна, и минимальным, если ППА горизонтальна.

Как следует из теоретических представлений, интенсивность этих двух составляющих  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$ , поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях, будет изменяться в зависимости от угла падения света  $\alpha$  в соответствии с графиком, представленным на рис. 3.

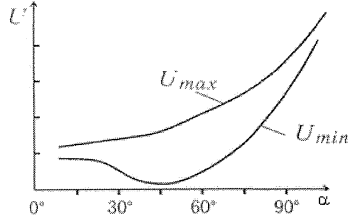


Рис. 3. Зависимость интенсивности от угла падения

Изменяя угол падения света на пластину и отмечая показания вольтметра, можно найти *угол полной поляризации* или *угол Брюстера*.

Для изучения закона Малюса используют дополнительный поляризатор 2 (см. рис. 2).

# П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

## 1. Исследование поляризации отраженного света

### Выполнение измерений

1. Снимите с установки поляризатор 2 (см. рис. 2).
2. Снимите держатель пластин (крышка на корпусе).
3. Включите источник света 1 и вольтметр 8.
4. Установите анализатор 5 (блок А-Ф) напротив выходного отверстия корпуса (угол отражения  $180^{\circ}$ ).
5. Убедитесь, в том, что световой луч, прошедший через входное отверстие корпуса, попадает на фотоэлемент 7 анализатора (показания вольтметра не равны нулю). В случае необходимости отрегулируйте установку для получения максимальных показаний вольтметра, перемещая линзу по оптической скамье, изменяя высоту источника света или корпуса.
6. Закрепите на держателе обойму с четырьмя пластинами и установите ее в корпус.
7. Установите угол падения света  $\alpha = 25^{\circ}$  (красная стрелка держателя должна указывать на это значение).
8. Поверните блок А-Ф в положение  $2\alpha$  (по закону оптики: угол отражения равен углу падения, то есть отраженный свет в таком положении попадает на фотоэлемент), запишите в табл. 1 показания вольтметра  $U$ , пропорциональные интенсивности света, прошедшего через анализатор при двух положениях ППА: при  $0^{\circ}$  и при  $90^{\circ}$  (угол задается на блоке А-Ф).
9. Проведите аналогичные измерения п.п. 7–8 для других углов падения света, указанных в табл. 1.

Таблица 1

	ППА	Угол падения $\alpha, ^{\circ}$														
		25	30	35	40	45	50	53	55	57	59	62	65	70	75	
$U_{\max}, \text{мВ}$																
$U_{\min}, \text{мВ}$																
$P$																
Угол Брюстера $\alpha_{\text{Бр}} =$		; показатель преломления стекла $n =$														

### Обработка результатов измерений

1. Для каждого угла падения рассчитайте степень поляризации отраженного света по формуле (3), подставляя вместо интенсивности света  $I$  измеренные значения  $U$ .
2. На одном поле чертежа постройте графики зависимостей минимального  $U_{\min}$  и максимального напряжения  $U_{\max}$ , степени поляризации  $P$  от угла падения  $\alpha$ .
3. По последнему графику определите угол Брюстера.
4. По формуле (1) рассчитайте показатель преломления пластины  $n$ .
5. Сделайте вывод.

## 2. Исследование поляризации света, прошедшего через пластины

### Выполнение измерений

1. Установите держатель блока А–Ф на угол  $180^\circ$ . Его положение в этом опыте остается неизменным.
2. Установите в установку обойму с двумя пластинами ( $N=2$ ) и установите угол падения света, равный углу Брюстера, найденному в задании 1.
3. Измерьте интенсивность прошедшего через пластины света при двух положениях ППА:  $U_{\max}$  при  $0^\circ$  и  $U_{\min}$  – при  $90^\circ$  и запишите их в таблицу.
4. Повторите аналогичные измерения для обойм с  $N = 4, 7, 12$  пластинами.

Таблица 2

Число пластин $N$	Показания вольтметра, мВ		Степень поляризации $P$
	$U_{\max}$ (ППА $0^\circ$ )	$U_{\min}$ (ППА $90^\circ$ )	
2			
4			
7			
12			

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте по формуле (3) степень поляризации света.
2. Постройте график зависимости степени поляризации отраженного света от числа пластин.
3. Сделайте вывод о характере полученной зависимости.

## 3. Изучение закона Малюса

### Выполнение измерений

1. Снимите с установки обойму с пластинами. Крышку корпуса верните в исходное положение на установке.
2. Установите держатель блока А–Ф в положение  $180^\circ$ .
3. Между источником света и установкой поместите поляризатор 2.
4. Установите ППА на блоке А–Ф на  $0^\circ$ . Изменяя положение ППП на поляризаторе ( $\varphi_{\text{ППП}}$ ) от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  через  $15^\circ$ , запишите в табл. 3 показания вольтметра  $U_{\text{П}}$  (интенсивность света, прошедшего через поляризатор и неподвижный анализатор).

Таблица 3

$\varphi_{\text{ППА}}=0$	$\varphi_{\text{ППП}}$	0	15	30	...	150	165	180
	$U_{\text{П}}, \text{ мВ}$							
$\varphi_{\text{ППП}}=0$	$\varphi_{\text{ППА}}$	0	15	30	...	150	165	180
	$U_{\text{А}}, \text{ мВ}$							
$U_{\text{ср}}$								
$U_{\text{ср}}^2$								
$\cos^2 \varphi$		1	0,93	0,75		0,75	0,93	1

5. Установите ППП на поляризаторе на  $0^\circ$ . Изменяя положение ППА на блоке А–Ф ( $\varphi_{\text{ППА}}$ ) от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  также через  $15^\circ$ , запишите в табл. 3 показания вольтметра  $U_A$  (интенсивность света, прошедшего через неподвижный поляризатор и анализатор).

#### *Обработка результатов измерений*

1. Вычислите среднее значение  $U_{\text{ср}}$  для каждого угла  $\varphi$ .
2. Рассчитайте квадрат среднего значения  $U_{\text{ср}}^2$ .
3. Постройте график зависимости квадрата  $U_{\text{ср}}$  от квадрата косинуса угла  $\varphi$ . При этом проведите прямую линию по полученным экспериментальным точкам в области больших значений  $U^2$ . Затем проведите параллельно опытной прямой теоретическую линию, которая согласно закону Малюса, проходит через точку  $(0, 0)$ .
4. В выводе отразите способ анализа заведомо поляризованного света и возможные причины систематической погрешности, которая приводит к смещению опытной зависимости относительно теоретической.

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного и частично поляризованного?
2. Могут ли продольные волны быть плоскополяризованными?
3. Перечислите способы получения поляризованного света.
4. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
5. Сформулируйте закон Брюстера.
6. Укажите положение плоскостей поляризации отраженного и преломленного света.
7. Покажите, что отраженный и преломленный лучи при соблюдении условия Брюстера будут взаимно перпендикулярны.
8. Сформулируйте закон Малюса.
9. Почему при любом положении анализатора частично поляризованный свет проходит через него?

#### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.– М.: Высш. школа, 1989. – 608 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – § 190–191.

## Работа № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЦЕЛЬ: изучение работы пирометра и определение поглощательной способности вольфрама.

ОБОРУДОВАНИЕ: источник теплового излучения, пирометр, источник тока, амперметр, вольтметр.

#### В в е д е н и е

*Тепловым* называют излучение, мощность и спектральный состав которого зависят от температуры. В отличие от всех других видов излучения тепловое излучение является *равновесным*.

Поглощательная способность  $A_{\nu,T}$  показывает отношение потока энергии, поглощенной поверхностью в узком интервале частот ЭМВ (от  $\nu$  до  $\nu+\Delta\nu$ ), к падающему тепловому потоку в этом же интервале:

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,T}^{\text{погл}}}{dW_{\nu,T}}. \quad (1)$$

Тела, которые полностью поглощают энергию электромагнитных волн всех частот при любой температуре  $T$ , называют *абсолютно черными* (АЧТ). Для абсолютно черного тела  $A_{\nu,T} = 1$ , и мощность теплового излучения с единицы поверхности, так называемая энергетическая светимость  $R_T$ , определяется законом Стефана–Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$  – постоянная Стефана–Больцмана, а нижний индекс “e” является символом АЧТ. Однако этот закон не применим для реальных тел, у которых поглощательная способность всегда меньше единицы и, кроме того, зависит от частоты и температуры:

$$A_{\nu,T} = f(\nu, T).$$

Излучательная способность, или спектральная плотность энергетической светимости  $R_{\nu,T}$  – это мощность излучения с единицы поверхности в единичном интервале частот. Для реальных тел величина  $R_{\nu,T}$  также зависит от температуры тела и частоты излучения:

$$R_{\nu,T} = f(\nu, T).$$

Обе эти функции являются сложными и зависят от природы излучающего тела. Однако отношение излучательной способности при данной температуре не зависит от природы тела и равно испускательной способности АЧТ  $r_{\nu,T}$  при той же температуре (Закон Кирхгофа):

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}. \quad (3)$$

Энергетическая светимость и излучательная способность связаны между собой соотношением

$$R_T = \int_0^\infty R_{\nu,T} d\nu. \quad (4)$$

Выразив  $R_{\nu,T}$  через  $r_{\nu,T}$  из формулы (3), получим для реальных тел

$$R_T = \int_0^\infty A_{\nu,T} r_{\nu,T} d\nu. \quad (5)$$



## М е т о д   и з м е р е н и я

Найти аналитическую зависимость  $R_T$  от температуры для реальных тел не удастся. Поэтому температурная зависимость энергетической светимости реальных тел может быть получена с определенным приближением. Одно из таких приближений состоит в том, что поглощательная способность тела  $A$  не зависит от частоты излучения. Тела, для которых справедливо это утверждение, называют *серыми*. Таким образом, можно рассчитать энергетическую светимость реальных тел, если считать их серыми. В этом случае из уравнения (5) следует:

$$R_T = A_T \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu = A_T \sigma T^4. \quad (6)$$

Это выражение является законом Стефана-Больцмана для серых тел.

Если серое тело, температура которого поддерживается постоянной благодаря подводу мощности  $P$  отдает энергию только путем *теплового излучения* (теплопроводность и конвекция пренебрежимо малы) и тело находится в среде с температурой  $T_1$ , то закон сохранения энергии можно записать так:

$$P + A_T \sigma T_1^4 S = A_T \sigma T^4 S, \quad (7)$$

где  $A_T \sigma T_1^4 S$  – тепловая мощность, подводимая к рассматриваемому телу за счет излучения окружающих тел с температурой  $T_1$ ;  $T$  – температура излучающей поверхности,  $S$  – ее площадь.

Отметим, что если исследуемое тело имеет температуру  $T \geq 1000$  К и выше, а окружающие тела имеют  $T_1 = 300$ – $400$  К, то ввиду того, что мощность излучения пропорциональна  $T^4$ , величина  $A_T \sigma T_1^4 S$  составляет не более 2% от  $A_T \sigma T^4 S$ . Таким образом, если пренебречь излучением окружающих тел, то внесенная этим погрешность оказывается гораздо меньше, чем погрешность измерения температуры  $T$  с помощью пирометра. Это позволяет упростить равенство (7) и находить поглощательную способность исследуемого излучателя по формуле

$$A_T = \frac{P}{\sigma T^4 S}. \quad (8)$$

## О п и с а н и е   у с т а н о в к и

В качестве источника излучения в данной работе используют спираль лампы, накал которой определяется подводимой мощностью

$$P = IU, \quad (9)$$

где  $I$  – ток в лампе,  $U$  – напряжение, подаваемое на лампу.

Температуру нити накала лампы измеряют с помощью *оптического пирометра "с исчезающей нитью"*. Пирометр (рис. 1) состоит из объектива, эталонной лампы и окуляра. Нить накала эталонной лампы 3 подключена к источнику 10 постоянного напряжения 3–4 В. Для регулирования тока в эталонной лампе используют реостат 7, подвижный контакт которого перемещают поворотом ребристой круговой оправы, расположенной вокруг окуляра, либо справа от него. Красный светофильтр 4, пропускающий свет с длиной волны  $\lambda \approx 660$  нм, вводят поворотом рукоятки, размещенной вблизи окуляра.

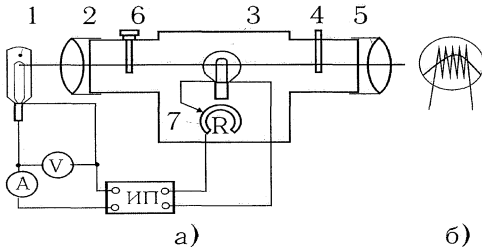


Рис. 1. Схема установки (а) и поле зрения пирометра (б):  
 1 – исследуемая лампа;  
 2 – объектив пирометра;  
 3 – эталонная лампа;  
 4 – красный светофильтр;  
 5 – окуляр пирометра;  
 6 – дымчатый светофильтр;  
 7 – реостат

Для измерения более высоких температур в окуляре пирометра размещены дымчатые фильтры 6, введение которых изменяет диапазон измеряемой температуры. Их вводят с помощью верхнего переключателя пирометра, стрелка на котором указывает шкалу, используемую при измерениях.

Измерение температуры пирометром осуществляют следующим образом. Пирометр, перемещая по вертикали и поворачивая, располагают так, чтобы нить эталонной лампы пересекала часть нити исследуемой лампы, как показано на рис. 1б. Подключив эталонную лампу, реостатом устанавливают в ней такой ток, чтобы в окуляре видна была светящаяся нить эталонной лампы. Перемещая окуляр поступательно, получают четкое изображение этой нити. Перемещая объектив поступательно, получают четкое изображение нити исследуемой лампы.

При недостаточном накале эталонной лампы место пересечения нитей кажется темным, а при слишком большом – светлым. Изменяя сопротивление реостата, можно **добиться одинаковой яркости** эталонной нити и исследуемой нитей. В этом случае они сольются, и **участок эталонной нити как бы исчезнет на фоне изображения исследуемой лампы**. Это означает, что излучательная способность тел совпадает в области  $\lambda \approx 660$  нм.

Шкалу пирометра предварительно градуируют в единицах температуры по шкале Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) по излучению АЧТ; при этом устанавливают, при каком токе эталонной лампы яркость ее нити в области 660 нм совпадает с яркостью АЧТ. Для реальных тел истинная температура будет выше той, которую покажет пирометр. Показываемую пирометром температуру  $T_{\text{я}}$  называют **яркостной температурой тела**. Для определения истинной температуры  $T$  нужно ввести поправку  $\Delta T$ , которая зависит от температуры и материала исследуемого тела:  $T = T_{\text{я}} + \Delta T$ . Для каждого излучающего тела дается **график поправок**.

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

### 1. *Определение точности измерения яркостной температуры с помощью пирометра*

#### *Выполнение измерений*

1. Подайте питание на нить исследуемой и эталонной лампы.
2. Перемещая окуляр пирометра, добейтесь четкого изображения эталонной нити.

3. В случае необходимости подберите такое положение пирометра, чтобы нити накала эталонной и исследуемой ламп перекрывались. Перемещая объектив, добейтесь четкого изображения нити исследуемой лампы.

4. С помощью источника питания установите напряжение 4 В.

5. Введите красный светофильтр.

6. Изменяя накал эталонной лампы, установите одинаковую яркость нитей. Отметьте по шкале пирометра яркостную температуру и занесите ее значение в табл. 1.

7. Не меняя напряжения на исследуемой лампе, проводите еще 6 измерений температуры, записывая результаты в табл. 1. *Важно, чтобы измерения были независимы*, т.е. всякий раз необходимо уменьшить накал эталонной лампы и вновь выравнять яркости нитей.

Таблица 1

$N$	$T_{я}, ^\circ C$	$(\bar{T}_{я} - T_{яi})$	$(\bar{T}_{я} - T_{яi})^2$	$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum(\bar{T}_{я} - T_{яi})^2}{N(N-1)}} =$ $P =$ $N =$ $t_{P,N} =$ $\Delta T = \sigma_T \cdot t_{P,N} =$
1				
7				
Средняя $\bar{T}_{я}$		$\sum(\bar{T}_{я} - T_{яi})^2 =$		

*Обработка результатов измерений*

1. Рассчитайте среднее значение яркостной температуры  $\bar{T}_{я}$ .

2. Вычислите среднеквадратичное отклонение  $\sigma_T$ . Определите коэффициент Стьюдента  $t_{P,N}$  (см. приложение 2.1) и рассчитайте абсолютную погрешность  $\Delta T$ .

3. Оцените относительную погрешность отдельного измерения  $\delta T = \Delta T / \bar{T}_{я}$  и сделайте вывод о точности измерения температуры пирометром.

*2. Определение поглощательной способности вольфрама*

*Выполнение измерений*

1. Подайте питание на нити исследуемой и эталонной ламп.

2. Перемещая окуляр, добейтесь чёткого изображения эталонной нити.

3. Подберите такое положение пирометра, чтобы нити накала эталонной и исследуемой ламп перекрывались. Перемещая объектив, добейтесь четкого изображения нити исследуемой лампы.

4. Введите красный светофильтр.

5. Установите напряжение, при котором заметно свечение исследуемой лампы (см. рис. 16). Запишите в табл. 2 показания амперметра и вольтметра.

6. Изменяя накал эталонной лампы, установите одинаковую яркость нитей. Определите по пирометру яркостную температуру 3 раза при неизменных  $I$  и  $U$ . Запишите результаты этих измерений в табл. 2.

7. Аналогичные измерения проводите 5 раз, повышая напряжение  $U$  на 0,5 В.

Таблица 2

$S = 2 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$									
N	U, В	I, А	Яркостная температура, °С				$\Delta T, \text{ К}$	T, К	A
			$T_{я1}$	$T_{я2}$	$T_{я3}$	$\bar{T}_{я}$			
1									
...									
6									
								Среднее	

*Обработка результатов измерений*

1. Рассчитайте средние значения яркостных температур  $\bar{T}_{я}$ .
2. По графику (рис.2) определите поправки  $\Delta T$  и, прибавляя их к яркостным температурам, найдите истинные значения:  $T = T_{я} + \Delta T + 273, \text{ К}$ .
3. Рассчитайте поглощательную способность нити A для каждой температуры, используя формулы (8) и (9).
4. Найдите среднее значение поглощательной способности A.

$\Delta T, \text{ К}$

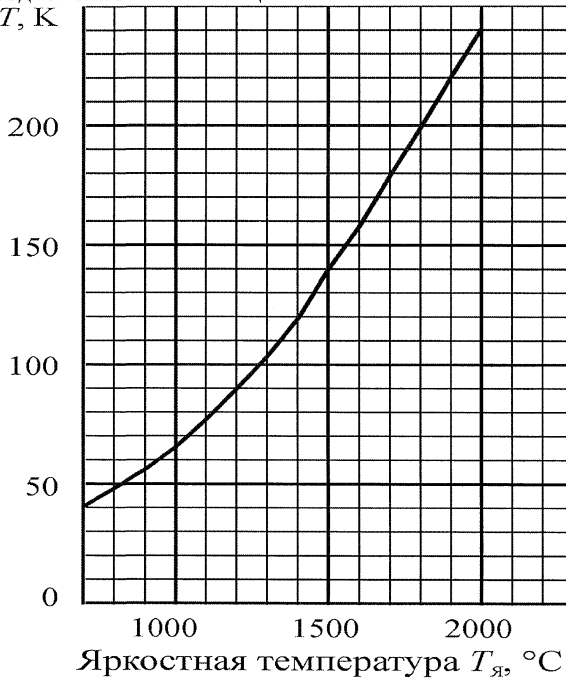


Рис.2. График поправок для определения истинной температуры

5. Оцените точность отдельного измерения величины  $A$  по формуле (14) приложения 2:  $\delta_\alpha = \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2 + (4\delta_T)^2} \cong 4\delta_T$ , где погрешность  $\delta_T$  найдена в задании 1, либо ее можно оценить по разбросу значений  $T_\alpha$  как  $\delta T = \Delta T / T_\alpha$  с учетом  $\Delta T = (T_{\alpha \max} - T_{\alpha \min})/2$ .

6. Оцените интервал полученных значений:  $\Delta A = (A_{\max} - A_{\min})/2$  и его относительную величину  $\delta A^* = \Delta A/A$ .

7. Сравните  $\delta A^*$  с точностью измерений ( $\delta A$ ) и сделайте заключение о том, можно ли считать поверхность вольфрамовой нити *серой* в исследованном интервале температур.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. В чем состоит основное отличие теплового излучения от всех других видов излучения?
2. Что такое тепловой поток, световой поток? Их единицы?
3. Какое излучение называют равновесным?
4. Что называется энергетической светимостью, излучательной, и поглощательной способностью тел?
5. Какие тела называются серыми? В чем отличие серого тела от АЧТ?
6. Сформулируйте и запишите законы теплового излучения.
7. Выведите формулу для расчета поглощательной способности излучателя в данной работе.
8. Опишите применяемый в данной работе метод определения температур.
9. Что такое яркостная температура?
10. Как перейти от яркостной к истинной температуре?
11. Каково устройство пирометра с исчезающей нитью?
12. Запишите закон сохранения энергии применительно к телу, температура которого поддерживается постоянной.
13. Каково значение постоянной Стефана-Больцмана и ее единицы?
14. Для чего в пирометре используется красный светофильтр?
15. Каково назначения дымчатого фильтра?
16. Для чего пирометр имеет две или три шкалы?

### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. школа, 1989. – § 35.1–35.3.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994. – § 197–201.

## Работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

**ЦЕЛЬ:** снятие вольт-амперной характеристики фотоэлемента (ВАХ), определение красной границы фотоэффекта, работы выхода электрона и постоянной Планка.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** фотоэлемент, осветитель, набор светофильтров, микроамперметр, вольтметр.

#### В в е д е н и е

Внешним фотоэффектом называют процесс испускания электронов с поверхности металла под действием света. Согласно квантовой теории всякое тело может поглощать и испускать энергию порциями, содержащими целое число элементарных порций – *квантов энергии*. Энергия фотона  $\varepsilon$  определяется по *формуле Планка*:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где  $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$  Дж с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света.

Закон сохранения энергии при неупругом взаимодействии взаимодействия фотона со свободным электроном металла выражается *уравнением Эйнштейна* :

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Из уравнения Эйнштейна видно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от интенсивности света, а от его частоты и работы выхода  $A$ . При уменьшении частоты света скорость выбитых электронов уменьшается и при некоторой частоте  $\nu_0$  становится равной нулю. Частоту  $\nu_0$ , ниже которой фотоэффект у данного металла не наблюдается, называют *граничной частотой фотоэффекта*:

$$h\nu_0 = A. \quad (2)$$

Особенности фотоэлементов определяются их спектральной и вольт-амперной характеристиками. *Спектральная характеристика* определяет область спектра, в которой может применяться фотоэлемент.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоэлемента (рис. 1) выражает зависимость фототока  $I$  от разности потенциалов  $U$  между электродами. С увеличением  $U$  фототок растет до определенного предельного значения  $I_n$  – ток насыщения, который согласно закону Столетова пропорционален световому потоку  $\Phi$ , падающему на катод:

$$I_n \sim \Phi. \quad (3)$$

Фототок полностью прекращается при наложении задерживающего напряжения  $U_3$  обратной полярности по сравнению с ускоряющим. При  $U=U_3$  кинетическая энергия всех фотоэлектронов снижается до нуля под действием электрического поля, так как равна работе, совершаемой полем:

$$mv^2/2 = eU_3. \quad (4)$$

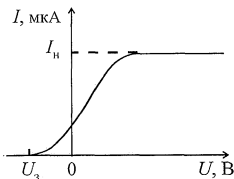


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика

## М е т о д   и з м е р е н и й

В соответствии с уравнениями (1) и (4) имеем:

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}. \quad (5)$$

Это соотношение указывает на возможность экспериментального определения работы выхода  $A$  и постоянной Планка  $h$  по зависимости задерживающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  падающего на фотоэлемент света. Согласно уравнению (5) зависимость  $U_3 = f(\nu)$  представляет собой прямую линию (рис. 2) с угловым коэффициентом, равным  $\frac{h}{e}$ . На оси ординат прямая отсекает отрезок равный  $\frac{A}{e}$ .

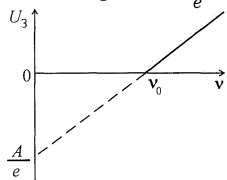


Рис. 2. Зависимость задерживающего напряжения от частоты

Этот способ определения работы выхода  $A$  основан на экстраполяции графика до значения  $\nu = 0$ . Хотя эта область весьма далека от частот, измеряемых в работе, можно достаточно точно определить значение отрезка  $\frac{A}{e}$  и, следовательно, работу выхода электрона.

Изучение закона Столетова состоит в построении графика зависимости фототока насыщения  $I_n$  от светового потока  $\Phi$ , падающего на фотокатод. При изменении накала лампы изменяется и спектральный состав света. Поэтому для изменения  $\Phi$  в работе изменяют расстояние от лампы до фотоэлемента. Если лампу считать изотропным источником света с силой света  $I_0$ , то на расстоянии  $r$  от нее освещенность

$$E = I_0/r^2. \quad (6)$$

Световой поток, падающий на фотокатод с площадью  $S$

$$\Phi = ES = I_0 S/r^2. \quad (7)$$

Согласно этому выражению закону Столетова соответствует прямая линия на графике зависимости  $I=f(1/r^2)$ .

## О п и с а н и е   у с т а н о в к и

Фотоэффект изучают на установке (рис. 3), состоящей из фотоэлемента 3 и лампы накаливания 1, размещаемых на оптической скамье, а также цифровых микроамперметра и вольтметра, конструктивно объединенных вместе с реостатов в один электронный блок приборов. Вакуумный фотоэлемент заключен в защитный кожух с окном и представляет собой стеклянный баллон, половина которого изнутри покрыта тонким слоем щелочного металла. Этот слой является катодом фотоэлемента. Анодом служит металлическое кольцо, расположенное в центре баллона. Источником света является галогенная лампа накаливания, напряжение на которой можно регулировать ручкой, размещенной в левой части лицевой панели электронного блока. Монохроматическое излучение получают с помощью светофильтров 2, закрепленных во вращающейся оправе ( $\lambda$  светофильтров указаны на установке). Фототок измеряют цифровым микроамперметром. Напряжение на фотоэлементе можно изменять вращением ручки реостата и измерять цифровым вольтметром. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего

напряжений служит специальный переключатель полярности 5, расположенный в нижней части панели электронного блока.

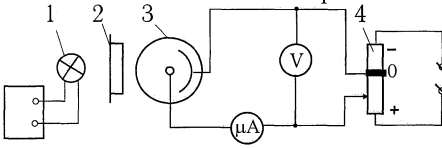


Рис. 3. Схема установки:

- 1 – лампа накаливания;
- 2 – светофильтры в оправе;
- 3 – фотоэлемент;
- 4 – реостат

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

### 1. Построение вольт-амперной характеристики

#### Выполнение измерений

1. Источник света, набор светофильтров и фотоэлемент расположите на оптической скамье *как можно ближе друг к другу*.
2. Включите электронный блок приборов и установите режим ускоряющего напряжения. Выберите один из светофильтров и подберите такой накал лампы (световой поток), чтобы фототок при  $U=0$  был в интервале 0,1 – 0,3 мкА.
3. Устанавливая напряжение на фотоэлементе, указанные в табл. 1, измеряйте фототок и записывайте его в табл. 1.
4. Не меняя светофильтр, переключите режим работы на задерживающее напряжение, и определите задерживающий потенциал (т.е. напряжение, при котором фототок будет равен 0), результат запишите в первую графу табл. 1.

Таблица 1

	Цвет	$\lambda =$ нм									
Напряжение $U, \text{В}$		0	1,	2,	3,	5,	8,	10	12	16	20
Фототок $I, \text{мкА}$	0										

#### Обработка результатов измерений

1. Постройте график зависимости фототока от напряжения на фотоэлементе.
2. Сделайте анализ полученной ВАХ фотоэлемента.

### 2. Определение работы выхода и постоянной Планка

#### Выполнение измерений

1. На оптической скамье расположите источник света, набор светофильтров и фотоэлемент *как можно ближе друг к другу*. Установите в лампе накаливания максимальный ток.
2. В табл. 2 запишите длины волн  $\lambda$ , пропускаемых светофильтрами, *в порядке их уменьшения* (т.е. в порядке возрастания частот!), тогда задерживающий потенциал должен изменяться тоже монотонно.



3. Поменяйте полярность напряжения на фотоэлементе. Для этого переключите тумблер в нижней части панели электронного блока в режим задерживающего напряжения.

4. Плавно вращая ручку реостата (правая часть панели), определите задерживающий потенциал для каждого из светофильтров. Повторите измерения еще два раза.

Таблица 2

Цвет светофильтра							
$\lambda$ , нм							
$\nu$ , $10^{14}$ Гц							
Задерживающий потенциал $U_3$ , В							
Средний $U_{3, \text{ср}}$ , В							

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте среднее значение задерживающего потенциала  $U_3$ . Результаты запишите в табл. 2.

2. Постройте график линейной зависимости задерживающего потенциала от частоты. Экстраполируйте прямую до пересечения с осью ординат (см. рис. 2).

3. По графику найдите граничную частоту  $\nu_0$  и напряжение  $U_3 = A / e$ .

4. По формуле  $A = U_3 \cdot e$  (эВ) =  $U_3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  (Дж) вычислите работу выхода  $A$ .

5. Вычислите постоянную Планка  $h = A / \nu_0$ .

6. Рассчитайте относительную погрешность  $\delta_h = (h - h_{\text{табл}}) / h_{\text{табл}}$ .

7. Вычислите абсолютную погрешность  $\Delta h = h \cdot \delta_h$ .

8. В выводе отразите возможности метода измерения одной из фундаментальных физических констант – постоянной Планка.

### 3. Изучение закона Столетова

#### Выполнение измерений

1. Установите режим ускоряющего напряжения.

2. Разместите на оптической скамье лампу накаливания и фотоэлемент на расстоянии друг от друга 320–330 мм. Уберите набор светофильтров. Установите напряжение на фотоэлементе, соответствующее началу эффекта насыщения (см. табл. 1).

3. Установите максимальный накал лампы. Измерьте фототок.

4. Отодвигая фотоэлемент каждый раз на 40-50 мм (*и сохраняя при этом ориентацию фотоэлемента на источник света*), измерьте фототок при различных расстояниях  $r$  от источника света до фотоэлемента. Результаты измерений записывайте в табл. 3.

Таблица 3

Расстояние $r$ , м							
Величина $1/r^2$ , $\text{м}^{-2}$							
Фототок $I_H$ , мкА							

### Обработка результатов измерений

1. Постройте график зависимости фототока насыщения от обратного квадрата расстояния.
2. В выводе отразите, есть ли соответствие полученной зависимости закону Столетова.

### К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Что такое световой поток?
2. Связь между длиной волны, частотой и скоростью света.
3. Что такое фотон (квант света)? Какова энергия фотона?
4. В чем заключается явление фотоэффекта?
5. Запишите и объясните ЗСЭ (уравнение Эйнштейна) для фотоэффекта.
6. Что такое граничная частота (красная граница фотоэффекта)?
7. От чего зависит скорость фотоэлектронов?
8. Что называют спектральной характеристикой фотоэлемента и ВАХ?
9. Какой вид имеет ВАХ при освещении фотоэлемента светом, частота которого : а) больше граничной, б)  $\nu < \nu_{гр}$ , в)  $\nu = \nu_{гр}$ ?
10. Сформулируйте закон Столетова для фотоэффекта.
11. Объясните термин «задерживающий потенциал». Как его найти?
12. Как зависит величина  $U_3$  от частоты падающего света?
13. Чему равен угловой коэффициент зависимости  $U_3 = f(\nu)$ ?
15. Что называется спектральной и вольт-амперной характеристиками ФЭ?
16. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика при освещении его светом:  
а) с частотой, большей граничной;  
б) с частотой, меньшей граничной;  
в) равной граничной частоте?
17. Как устроен вакуумный фотоэлемент?

### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.– М.: Высш. школа, 1989. – § 36.1–36.2.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1994.– § 202–204.

## Работа № 8

### ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ

**ЦЕЛЬ:** градуировка спектрометра, измерение длин волн оптических спектров, определение постоянной Ридберга.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** спектрометр, водородная и ртутная лампы, источник питания.

#### В в е д е н и е

Излучение различных источников состоит из электромагнитных волн с различными длинами  $\lambda$ . Получение спектра путем разложения излучения на отдельные монохроматические пучки, осуществляют обычно с помощью призмы, либо с помощью дифракционной решетки.

Газы имеют наиболее простые спектры и по виду, и по закономерностям расположения. Эти спектры линейчатые, т.е. представляют собой набор линий, каждой из которых соответствует определённая длина волны  $\lambda$ . Некоторые из этих линий лежат в видимой области спектра, но большая часть их находится в инфракрасной или в ультрафиолетовой области спектра и непосредственно глазом не воспринимается. Закономерности расположения линий хорошо изучены в спектре наиболее простого атома – водорода.

Спектр атома водорода содержит несколько серий, для каждой из которых длина волны выражается как функция натуральных чисел:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (1)$$

где  $R = 1,0967 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $n$  и  $k$  – целые числа:  $n$  – номер серии  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $k = n+1, n+2, n+3, \dots$ .

Несколько линий спектра атома водорода схематически изображены на рис. 1. Самую длинноволновую линию серии называют *головной* и обозначают  $\lambda_{\alpha}$ , далее следует  $\lambda_{\beta}$ ,  $\lambda_{\gamma}$  и так далее.

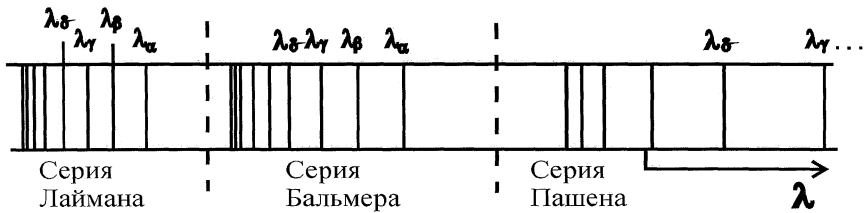


Рис. 1. Участок спектра излучения атома водорода

Первая квантовая теория атома водорода, объясняющая линейчатый спектр испускания и сериальную формулу (1), разработана Н. Бором на основе планетарной ядерной модели строения атома. В основе теории Бора лежат следующие постулаты, разрешающие только квантовые состояния атома:

1. Электрон, вращаясь вокруг ядра, находится в одном из стационарных состояний, для которых момент импульса электрона квантован:

$$mvr = n\hbar. \quad (2)$$

2. Электрон, движущийся по любой стационарной орбите, не излучает и не поглощает энергию.

3. При переходе электрона с одной из дальних стационарных орбит на более близкую к ядру атом излучает квант энергии, который равен разности энергий электрона на стационарных состояниях  $W_k$  и  $W_n$ :

$$h\nu = W_k - W_n. \quad (3)$$

### Метод измерений

Из теории Бора следует, что числа  $k$  и  $n$  в формуле (1) – это номера орбит, между которыми происходит переход электрона. Полагая в формуле (1)  $n = 1$ ,  $k = 2, 3, \dots$  получим выражение, позволяющее рассчитать длины волн линий, входящих в *серию Лаймана*. Все линии этой серии расположены в ультрафиолетовой области спектра. Полагая  $n = 2$  и  $k = 3, 4, \dots$ , получаем серию Бальмера, часть линий которой находится в ультрафиолетовой, а четыре линии – в видимой области спектра. Из них числу  $k = 3$  соответствует красная линия, которую обозначают  $\lambda_{\alpha}$ ,  $k = 4$  – синяя,  $k = 5$  – сине-фиолетовая и так далее. Эта часть спектра атома водорода изучается в эксперименте. В инфракрасной области спектра атомов водорода находятся все остальные серии.

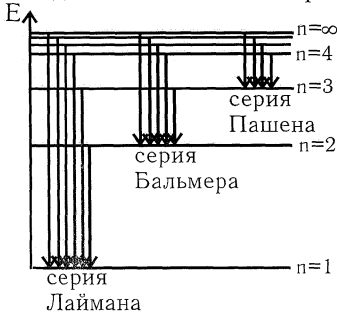


Рис. 2

Описанные переходы электронов в атоме водорода можно показать на диаграмме энергетических состояний (рис. 2), где горизонтальные линии означают уровни энергии, а стрелки – направление электронных переходов, которые сопровождаются излучением света.

Измеряя длины волн линий в спектре атомов водорода, можно с помощью формулы (1) определить в эксперименте постоянную Ридберга.

### Описание установки

Приборы, предназначенные для получения спектров и позволяющие измерять длины волн, называются *спектрометрами*. Исследуемый свет от источника 1 попадает на входную щель 2 прибора. Главной частью спектрометра (рис. 3) является призма 4, разлагающая свет в спектр. Параллельный пучок света, направленный на призму, получают с помощью коллиматорной трубы 3, состоящей из щели и линзы. После преломления в призме и выхода из нее лучи собираются объективом в его фокальной плоскости, где получается изображение спектра. Спектр рассматривают через окуляр 5. В фокальной плоскости окуляра имеется неподвижная стрелка-указатель, с которой совмещают исследуемую линию спектра.

Спектрометр укреплен на оптической скамье. Ширину раскрытия входной щели можно изменять в пределах от 1 до 4 мм. Для точного регулирования ширины щели на барабанчике винта нанесены деления, цена которых 0,01 мм.

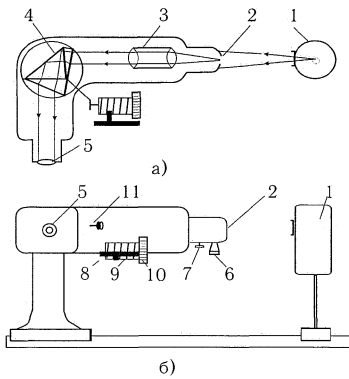


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) установки:

- 1 – газоразрядная лампа;
- 2 – входная щель;
- 3 – коллиматорная труба;
- 4 – призма;
- 5 – окуляр;
- 6 – винт для раскрытия щели;
- 7 – рукоятка затвора;
- 8 – измерительный барабан с винтовой шкалой;
- 9 – индекс-указатель;
- 10 – накатка для поворота барабана;
- 11 – винт для фокусировки спектральных линий

В трубе коллиматора помещен затвор, с помощью которого можно прекратить доступ света в прибор: движением затвора управляет рукоятка с надписью *открыто – закрыто*. Призма установлена на столике с рычагом, получающим движение от микрометрического поворотного механизма. На измерительном барабане этого механизма нанесены деления – градусы поворота барабана. Отсчет делают с помощью индекса-указателя 9, скользящего по специальной канавке.

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы

### 1. Градуировка спектрометра по линиям спектра ртути

#### Выполнение измерений

1. На оптическую скамью поместите ртутную лампу и включите её. Ртутная лампа сильно нагревается во время работы, а после выключения снова включается только после того, как остынет. Поэтому выключать ее следует только после проверки преподавателем полученных Вами результатов измерений.

2. Перемещая окуляр, добейтесь резкого изображения стрелки-указателя.

3. Регулируя ширину щели, добейтесь того, чтобы в поле зрения прибора были видны узкие спектральные линии.

4. Вращая измерительный барабан, пройдите все линии спектра ртути, указанные в таблице, и убедитесь, что индекс-указатель не выходит ни за левую, ни за правую границы винтовой шкалы.

5. Вращая измерительный барабан за накатку, совместите первую фиолетовую линию со стрелкой-указателем и сделайте отсчет  $\gamma_1$  по шкале барабана. Во время вращения прижимайте индекс-указатель к барабану, чтобы он не переходил на соседний виток бороздки.

6. Продолжайте поворачивать барабан *только за накатку*, поочередно совмещайте *каждую* спектральную линию со стрелкой-указателем и делайте соответствующие отсчеты  $\gamma_1$  по барабану. Результаты записывайте в табл. 1.

7. Вернитесь на начало шкалы, и повторите измерения еще дважды. Запишите результаты  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$ .

Таблица 1

Линии спектра ртути	Длина волны $\lambda$ , нм	Отсчет по шкале			
		$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	среднее
Первая фиолетовая	404,6				
Вторая фиолетовая	407,8				
Синяя (самая яркая из семейства синих)	435,8				
Первая голубая	491,6				
Вторая голубая	494,0				
Зеленая яркая	546,1				
Желтая первая	577,0				
Желтая вторая	579,0				
Красная (последняя яркая из красных)	690,7				

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте среднее значение  $\gamma$ .
2. Постройте градуировочный график спектрометра в координатах «длина волны  $\lambda$  – отчет по барабану  $\gamma$ », соединяя его точки плавной кривой.

### 2. Определение постоянной Ридберга

#### Выполнение измерений

1. Установите на оптическую скамью водородную лампу. Нажмите и держите кнопку включения водородной лампы.
2. Вращая барабан за накатку, последовательно совмещайте спектральные линии со стрелкой-указателем и записывайте отсчеты по шкале  $\gamma$  для линий, указанных в табл. 2. Важно не допускать смещение индекса-указателя, поэтому во время эксперимента придерживайте его пальцем.

Таблица 2

$n = 2$ ; серия Бальмера				
Линии спектра водорода	$k$	Отсчет по барабану $\gamma$ , град.	Длина волны $\lambda$ , нм	$R$ , $10^7 \text{ м}^{-1}$
Красная $H_\alpha$	3			
Синяя $H_\beta$	4			
Фиолетовая $H_\gamma$	5			
Среднее:				

### Обработка результатов измерений

1. По градуировочному графику найдите длины волн  $\lambda$  соответствующих линий и запишите их в табл. 2.
2. По формуле (1) рассчитайте постоянную Ридберга для каждого значения  $\lambda$ . Найдите среднее значение  $R$ .
3. Найдите погрешность величины  $R$ , сравнивая полученное значение с известным табличным значением.
4. В выводе сравните полученное значение  $R$  с табличным и сделайте заключение о точности спектроскопических методов.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какие вещества дают излучение с линейчатым спектром?
2. Какие особенности имеет спектр излучения атомов водорода?
3. Сформулируйте постулаты Бора, положенные в основу квантовой теории атома водорода.
4. Что Вы знаете о сериальных закономерностях в атоме водорода?
5. Запишите формулу для определения длины волны любой линии в спектре атома водорода.
6. Применима ли теория Бора к более сложным атомам?
7. Для чего используют спектрометры и как они устроены?
8. Как и для чего строится в работе градуировочный график?
9. Как определяют в работе постоянную Ридберга? Спектр излучения каких атомов используют для этого?

### Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.— М.: Высш. школа, 1989. — 608 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Трофимова Т.И. — М.: Высшая школа, 1994.— § 209–210, 212.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

## ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Построение графиков

Назначение графика – наглядно представить результаты опыта при изучении зависимости одной величины от другой. График позволяет увидеть особенности исследуемой зависимости, выявить ее характер (например, линейная, квадратичная или экспоненциальная) и определить ее параметры. Все это становится доступным при грамотном применении графического метода, а для этого необходимо следовать определенным правилам построения графиков и использовать методы их обработки.

1. **Выбор координатных осей.** График выполняют на листе миллиметровой бумаги размером  $\sim 150 \times 150$  мм и координатные оси берут примерно равной длины. 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. При этом множитель  $10^{\pm k}$  позволяет опустить нули при нанесении шкалы, например, писать 1, 2, 3 ... вместо 0,001; 0,002 и т.д.
2. **Выбор интервалов.** Интервалы чисел на каждой оси выбирают *независимо друг от друга*, причем такими, чтобы кривая заняла все поле чертежа. Для этого границы интервалов берут близкими к наименьшему и наибольшему среди измеренных значений. Подчеркнем, что начало отсчета часто начинают не с нуля. Нулевую точку помещают на график лишь в том случае, если она близка к экспериментально исследованной области или необходима экстраполяция на нулевое значение.
3. **Выбор масштабов и шкалы.** Масштаб должен быть простым и удобным для нанесения точек на график. За единицу масштаба принимают отрезок оси, кратный 5, 10, 50 или 100 мм, что позволяет легко отсчитывать доли отрезка. Такому отрезку соотносят "круглое" число (1, 2, 5) единиц измеряемой величины. Деления шкалы на каждой оси подбирают независимо, в соответствии с масштабом, причем надписи делений наносят вдоль всей оси. Чтобы шкала легко читалась, достаточно указать на оси 3–5 чисел.
4. **Нанесение точек.** Опытные данные наносят на поле графика в виде четких значков, *не подписывая их численные значения* – они приводятся в таблице. Разные значки (светлые и темные кружки, треугольники и др.) используют для обозначения данных, относящихся к различным условиям.
5. **Проведение экспериментальной кривой.** Кривую проводят тонкой *плавной, непрерывной* линией (таковы обычно физические зависимости), чтобы точки находились равномерно по обе стороны кривой как можно ближе к ней. Если вид зависимости известен заранее, то проводят эту теоретическую кривую. В случае линейной зависимости прямую проводят через среднюю точку, координаты которой:



$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^N x_i) / N; \quad \bar{y} = (\sum_{i=1}^N y_i) / N;$$

где  $N$  – общее число точек на графике.

6. **Заголовок графика.** График сопровождают названием зависимости, в котором поясняют символы переменных, указанные в конце осей. Кроме того, в подписи к графику разъясняют обозначения опытных точек и кривых, если их несколько. Заголовок принято располагать выше графика, либо под графиком.

## 1.2. Графический анализ опытных данных

### 1.2.1. Сравнение с теорией. Функциональные шкалы

Для проверки теоретической зависимости на график наносят опытные точки (нередко с указанием их погрешности в виде  $\overset{\pm}{I}-\Delta y$ ), а теоретическую кривую проводят через точки, рассчитанные по уравнению. Если теория дает лишь вид зависимости, а параметры ее неизвестны и их надлежит определить из опыта, то экспериментальную зависимость стараются привести к линейному виду (так как параметры прямой найти проще). С этой целью при построении графика по осям откладывают не сами измеренные величины, а такие функции этих величин, которые позволяют *линеаризовать зависимость*. Рассмотрим пример.

Опыт показывает, что электрическое сопротивление полупроводника снижается с ростом температуры нелинейно. Чтобы выбрать координаты, в которых зависимость линеаризуется, обратимся к теории. Согласно квантовой теории твердого тела сопротивление истинного полупроводника меняется с температурой по закону  $R = A \exp(\Delta W/2kT)$ . Логарифмируя это уравнение, получаем зависимость  $\ln R = \ln A + \Delta W/2kT$ , которая представится на графике в виде прямой  $y = b + Kx$ , если обозначить  $y = \ln R$ ,  $x = 1/T$ . Определяя параметры этой прямой  $b = \ln A$  и  $K = \Delta W/2k$ , можно найти характеристики полупроводника  $A$  и  $\Delta W$ .

### 1.2.2. Определение параметров линейной зависимости

Рассмотрим два наиболее распространенных метода:

- приближенный метод определения параметров прямой, использующий отрезки, отсчитанные по шкале на осях графика;
- метод наименьших квадратов (МНК).

#### П р и б л и ж е н н ы й м е т о д

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 **б**, удобные для расчета. Для снижения погрешности отсчета по графику и упрощения расчета углового коэффициента  $K$  удобно точку **a** взять на одной из осей, а точку **б** – так, чтобы отрезок  $(x_b - x_a)$  выражался целым числом.

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

$$\bar{K} = \frac{y_6 - y_a}{x_6 - x_a}. \quad (1)$$

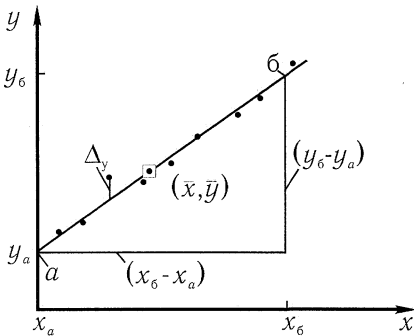


Рис. 1. Определение параметров  $K$  и  $b$

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

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

Случайные погрешности параметров определяются разбросом опытных точек относительно проведенной прямой. Для простейшей оценки этих погрешностей достаточно найти на графике величину  $\Delta_y$  – 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:

$$\delta_K = \frac{\Delta_y}{(y_N - y_1)} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Формула (4) привлекает тем, что при расчете отношения величин 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 среднего значения величины  $K$ :

$$\Delta_K = \bar{K} \delta_K / 100 \%, \quad (5)$$

которая позволяет записать доверительный интервал для искомого параметра  $K$ :

$$K = \bar{K} \pm \Delta_K. \quad (6)$$

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

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

## М е т о д   н а и м е н ь ш и х   к в а д р а т о в

МНК позволяет найти параметры "наилучшей" расчетной кривой – такой, чтобы ее расхождение с результатами опыта было минимальным. Отметим, что метод не дает вида зависимости  $y(x)$ . Последний выбирается либо из теоретических представлений, либо по данным эксперимента. Поэтому перед использованием МНК нужно убедиться, что опытные данные действительно соответствуют предполагаемой зависимости. Для этого прежде всего необходимо построить график по результатам опыта.

Метод основан на том, что критерием "наилучших" параметров искомой зависимости является минимальность суммы  $S$  квадратов отклонений опытных точек  $y_i$  от расчетной кривой, т.е. минимум величины

$$S = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2,$$

где  $f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)$  – значение искомой функции в  $i$ -той точке. Условия минимума при варьировании значений параметров  $a_j$  – равенство нулю соответствующих производных:  $\partial S / \partial a_j = 0$  (индекс  $j = 1, 2, \dots, m$ ), – дают  $m$  уравнений для отыскания  $m$  неизвестных параметров  $a_j$  расчетной зависимости  $f(x)$ .

МНК наиболее прост для линейной зависимости  $y = Kx + b$ , которая содержит два неизвестных параметра:  $K$  и  $b$ . В этом случае сумма наименьших квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^N [y_i - (Kx_i + b)]^2$$

достигается при выполнении условий  $\partial S / \partial K = 0$  и,  $\partial S / \partial b = 0$  из которых получены для искомых параметров следующие уравнения

$$K = \frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N \sum (x_i^2) - (\sum x_i)^2}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum y_i}{N} - K \frac{\sum x_i}{N} \quad \text{или} \quad b = \bar{y} - K\bar{x}, \quad (9)$$

где суммы вычисляют по всем опытным точкам ( $N$  слагаемых).

Уравнение (9) показывает, что расчетная прямая проходит через следующие две точки: начальную ( $x=0$ ;  $y=b$ ) и среднюю ( $\bar{x}$ ;  $\bar{y}$ ). При этом расположение опытных точек по отношению к прямой таково, что отклонения отдельных точек  $\Delta_y$  "выравниваются" – именно в этом случае сумма  $S$  минимальна. Если на графике есть одна точка с большим отклонением от прямой, то для выполнения условия  $S_{min}$  эта точка "подтянет" к себе расчетную прямую.

Для расчета среднего квадратического отклонения (СКО) искомых параметров (случайной погрешности) МНК дает следующие выражения:

$$\sigma_K[\Delta] = \frac{S_y}{\sqrt{\sum x^2 - (\bar{x})^2}}; \quad \sigma_b = \bar{x} \sigma_K[\Delta],$$

где  $S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - Kx_i - b)^2}{N(N-2)}}$ ;  $\bar{x}^2 = \sum (x^2) / N$ .

Расчеты по МНК обычно проводят на ЭВМ, используя стандартные программы. В лаборатории удобен программируемый микрокалькулятор, а также обычный микрокалькулятор с ячейкой памяти для вычисления сумм.

### *Пример применения МНК*

При использовании метода выполняют следующие операции.

1. Из теории или опытных данных выясняют вид зависимости. Если она линейная (например, известно уравнение температурной зависимости сопротивления металлов  $R(t) = R_0 + R_0 \alpha t$ ), или же из графика видно, что опытные точки располагаются близко к некоторой прямой, то можно применять для расчета ее параметров формулы (8), (9). Если экспериментальная зависимость нелинейная, то стараются преобразовать ее в линейную (см. *функциональные шкалы*).
2. Для расчетов параметров  $K$  и  $b$  по формулам (8), (9) предварительно вычисляют необходимые суммы по всем опытным точкам, а затем уже рассчитывают сами величины.
3. Наносят на поле графика начальную ( $x=0; y=b$ ) и среднюю ( $\bar{x}; \bar{y}$ ) точки и проводят через эти точки расчетную прямую, чтобы убедиться, что отклонения от нее опытных точек действительно минимальны.
4. Используя найденные значения параметров  $K$  и  $b$ , вычисляют случайные погрешности (СКО) этих величин по приведенным выше формулам. Записывают уравнение экспериментальной прямой и по найденным параметрам рассчитывают необходимые физические величины. Так, в примере с зависимостью  $R(t)$  находят температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = K / R_0$ , где величина  $R_0 = b$ .

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Прямые измерения

Напомним, что прямыми считают измерения, в которых величину определяют непосредственно по шкале прибора. Пусть проведено  $N$  измерений величины  $x$ . Полученный при этом результат принято указывать в виде доверительного интервала значений измеряемой величины:

$$x = \bar{x} \pm \Delta_x, \quad (10)$$

где  $\Delta_x$  – абсолютная погрешность величины  $x$  (граница доверительного интервала).

В одном из простейших методов оценки доверительного интервала в качестве границ берут минимальное и максимальное из полученных при измерениях значений  $x$ , т.е.  $\delta_{\min}$  и  $\delta_{\max}$ . При этом абсолютная погрешность:

$$\Delta_x = (x_{\max} - x_{\min})/2. \quad (11)$$

Такому доверительному интервалу соответствует вполне определенная доверительная вероятность, которая вычисляется по формуле (7). Это вероятность того, что истинное значение измеряемой величины находится внутри данного интервала.

Распространенный способ записи доверительного интервала в виде

$$x = \bar{x} \pm \sigma, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение (СКО).

Доверительному интервалу (12) при большом числе измерений ( $N > 100$ ) соответствует доверительная вероятность  $P = 0,68$ .

СКО имеет случайную и систематическую составляющую. Систематическая (приборная) составляющая СКО

$$\sigma[\Delta_S] = 1/3\Delta_S,$$

где  $\Delta_S$  – предельная приборная погрешность, величина которой приводится в паспорте прибора или определяется по его классу точности  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{ст}} 100\%}{x_{\max}},$$

где  $x_{\max}$  – предел измерений по шкале прибора.

Если класс точности прибора неизвестен, то предельную приборную погрешность принимают равной цене деления шкалы.

Случайная составляющая СКО рассчитывается по формуле

$$\sigma_x[\Delta] = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}. \quad (13)$$

По величине СКО можно найти границу доверительного интервала  $\Delta_x$  с необходимой доверительной вероятностью. Пересчет производят, используя

закон распределения Стьюдента, по соотношению

$$\Delta_x = \sigma_x \cdot t_{P,N},$$

где  $t_{P,N}$  – коэффициент Стьюдента.

Его значения, как функция величин  $P$  и  $N$ , приведены в табл.

Таблица

**Коэффициенты Стьюдента  $t_{P,N}$**

Число измерений $N$	Доверительная вероятность $P$						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,99
2	1,00	1,38	2,01	3,1	6,3	12,7	63,5
3	0,82	1,06	1,31	1,9	2,9	4,3	9,9
4	0,77	0,98	1,25	1,6	2,4	3,2	5,8
5	0,74	0,94	1,20	1,5	2,1	2,8	4,6
6	0,73	0,92	1,16	1,5	2,0	2,6	4,0
7	0,72	0,90	1,13	1,4	1,9	2,4	3,7
8	0,71	0,90	1,11	1,4	1,9	2,4	3,5
9	0,70	0,88	1,11	1,4	1,9	2,3	3,4
10	0,69	0,87	1,10	1,3	1,8	2,3	3,3
$\infty$	0,67	0,84	1,01	1,3	1,6	2,0	2,6

## 2.2. Косвенные измерения

Результат косвенных измерений величины  $z$  вычисляют по данным прямым измерений величин  $x_i$  с помощью какой-либо формулы. При этом в формулу подставляют средние значения

$$\bar{z} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m).$$

Для определения доверительного интервала величины  $z$  сначала находят ее относительную погрешность по формуле

$$\delta_z = \sqrt{\sum_1^m \left( \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta_{x_i} \right)^2}, \quad (14)$$

конкретный вид которой зависит от вида функции  $f$ , т.е. от расчетной формулы величины  $z$ . В случае степенной функции формула (14) имеет следующий вид:

$$\delta_z = \sqrt{\sum_1^m (a_i \delta_{x_i})^2}, \quad (15)$$

где  $a_i$  – показатель степени при  $x_i$ ,

$\delta_{x_i}$  – относительная погрешность величины  $x_i$ .

При вычислениях по формуле (15) погрешности  $\delta_{x_i}$ , величина которых менее 1/3 от максимальной, можно не учитывать, как не дающие заметного вклада в величину  $\delta_z$ .

Абсолютная погрешность величины  $z$ , найденная по формуле

$$\Delta_z = \bar{z} \cdot \delta_z,$$

позволяет записать доверительный интервал для величины  $z$  в виде

$$z = \bar{z} \pm \Delta_z.$$

Этому доверительному интервалу соответствует такая же доверительная вероятность  $P$ , как и для результатов прямых измерений величин  $x_i$ , использованных в расчете. Если же интервалы  $(x_i \pm \Delta_x)$  имеют разные значения  $P$ , то для величины  $z$  принимают наименьшую из этих доверительных вероятностей.

### **Библиографический список**

1. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая – Л.: Энергоатомиздат, 1990.– 288 с.
2. Привалова, Т.П. Методические указания к обработке результатов лабораторных измерений. – Челябинск: ЧПИ, 1982.– 48 с. (Шифр 530 (07) П 752).

## ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Число Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	$m_e = 0,911 \cdot 10^{-30}$ кг
Удельный заряд электрона	$e / m_e = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Масса протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Удельный заряд протона	$e / m_p = 0,96 \cdot 10^8$ кг
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Магнетон Бора	$\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м
	$1 / 4\pi\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^9$ м/Ф
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м



*Учебное издание*

Гришкевич А.Е., Морозов С.И., Пызин Г.П.,  
Хоменко Т.Н., Чудаков А.Е.

ФИЗИКА. ОПТИКА

Учебное пособие  
к выполнению лабораторных работ

Под редакцией Л.Ф. Гладковой

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.12.2015. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,25. Тираж 100 экз. Заказ 754/613.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.