

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

## **ФИЗИКА**



### **ОПТИКА**

Методические указания  
к лабораторным работам

Новосибирск 2013

УДК 535 (075)  
ББК 22.171

Кафедра теоретической и прикладной физики

Составители: доц. *И. М. Дзю*;  
канд. техн. наук, доц. *С. В. Викулов*;  
канд. техн. наук, доц. *В. Я. Чечуев*;  
ст. преп. *М. Г. Алешкевич*

Рецензент д-р техн. наук, проф. *П. М. Плетнев* (СГУПС)

**Физика. Оптика:** метод. указания/ Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т.; сост.: *И. М. Дзю, С. В. Викулов, В. Я. Чечуев, М. Г. Алешкевич*. — Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. — 35 с.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения и направлений подготовки, реализуемых в НГАУ.

Утверждены и рекомендованы к изданию методическим советом Инженерного института (протокол № 9 от 9 октября 2012 г.)

Эксперимент никогда не  
обманывает, обманчивы  
наши суждения

*Леонардо да Винчи*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Лабораторно-практические занятия по физике направлены на формирование компетенций в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами по направлениям подготовки, реализуемым в НГАУ.

Предварительное изучение содержания лабораторных работ по физике является необходимым условием их последующего выполнения в лаборатории.

Каждому студенту необходимо иметь тетрадь отчетов по проведенным лабораторным работам. Готовность студентов к выполнению лабораторных работ проверяется преподавателем. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются. Отчет по проведенной работе студент приносит на каждое последующее занятие.

Предварительное изучение теории является непременным условием выполнения лабораторных работ. В целях повышения эффективности этой предварительной работы описания лабораторных работ содержат достаточно полные теоретические введения и подробные указания по проведению опытов. Готовность студента к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем. Неподготовленные студенты к выполнению работ не допускаются. Отчет по выполняемой работе составляется дома. В конце методических указаний приводится список литературы для самоподготовки.

## Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

**Цель работы:** изучить законы фотоэффекта, для чего:

- 1) построить графики зависимости фототока от напряжения на аноде фотоэлемента для различных диафрагм и светофильтров;
- 2) определить максимальную скорость фотоэлектронов;
- 3) определить работу выхода и красную границу фотоэффекта для данного фотоэлемента;
- 4) по экспериментальным данным рассчитать постоянную Планка;
- 5) определить чувствительность фотоэлемента для различных длин волн света и построить график зависимости чувствительности от длины волны;
- 6) рассчитать число фотонов, падающих на фотоэлемент через различные диафрагмы для различных длин волн;
- 7) рассчитать выход фотоэлектронов для различных длин волн (выход определяется отношением числа фотонов к числу фотоэлектронов).

### **Теоретическое обоснование лабораторной работы**

Явление испускания электронов металлами при их освещении называется внешним фотоэффектом. Фотоэффект легко объясняется с помощью квантовой теории света, которая рассматривает свет как поток фотонов с энергией  $h\nu$  или  $hc / \lambda$ .

Попадая внутрь вещества, фотоны передают свою энергию электронам, часть этой энергии затрачивается на работу по преодолению сил взаимодействия электронов с ионами решетки (работа выхода), а оставшаяся часть уносится электронами в виде кинетической энергии.

Исследования фотоэффекта показали, что:

1. Величина фототока насыщения пропорциональна световому потоку. Величина светового потока характеризуется числом фотонов, испускаемых источником в единичный телесный угол за 1 с, поэтому первый закон имеет простое объяснение в рамках квантовой теории света.

2. Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от величины светового потока (при малых интенсивностях светового потока), а зависит только от длины волны, т.е. энергии кванта, но не от числа фотонов.

3. Для каждого вещества существует такая длина волны, когда для всех фотонов  $\lambda > \lambda_0$  фотоэффект не наблюдается, эта длина волны  $\lambda_0$  называется красной границей, т.к. при больших длинах световой волны энергии фотона  $hc / \lambda$  не хватает на выход электрона за пределы вещества.

Изучая законы фотоэффекта с помощью различных источников света, мы пользуемся световыми характеристиками этих источников. Величины световых характеристик не совпадают с энергетическими, т.к. световые характеристики устанавливались по восприятию света глазами. Это всегда нужно иметь в виду при расчетах и в каждом конкретном случае переводить световые единицы в энергетические. Для различных длин волн коэффициенты перерасчета разные (см. учебник И. В. Савельева, т. 2, с. 328, рис. 113.1; график).

За единицу силы света источника выбрана кандела (кд) — сила света эталонного источника (см. учебник И. В. Савельева, т. 2, с. 329, рис. 331).

Полный световой поток точечного источника излучается равномерно в телесный угол  $4\pi$  стерадиан. Поток излучения от источника единичной силы (1 кд) в единичный телесный угол (1 стерадиан) принят за единицу светового потока (люмен, лм).

Освещенность поверхности зависит от светового потока, падающего на единицу площади. Количественно освещенность измеряется в люксах (люкс = лм/м<sup>2</sup>, поток в 1 люмен равномерно распределен на площади 1 м<sup>2</sup>),

Чтобы рассчитать освещенность, которую создает точечный источник, воспользуемся определениями световых характеристик, обозначив силу света источника  $I$ , световой поток  $\Phi$ , телесный угол  $\Omega$ , который определяется как  $\Omega = S / r^2$ , где  $r$  — радиус сферической поверхности;  $S$  — площадь освещенной сферической поверхности, на которую опирается телесный угол;  $E$  — освещенность:

$$E = \Phi / S; \quad (1)$$

$$\Phi = I\Omega / 4\pi; \quad (2)$$

$$\Omega = S / r^2. \quad (3)$$

Отсюда освещенность, которую создает точечный источник, рассчитывается как  $E = I \cos a / 4\pi r^2$ , где  $a$  — угол падения световых лучей на освещаемую поверхность.

Чувствительность фотоэлемента характеризуется величиной фототока насыщения при освещении фотоэлемента световым потоком в 1 лм. Чувствительность фотоэлемента

$$\gamma = I_0 / \Phi. \quad (4)$$

При поглощении фотона часть его энергии расходуется на выход электрона из металла, оставшаяся часть присутствует в форме кинетической энергии электрона, что в математической формуле имеет вид

$$h\nu = A + mv^2 / 2,$$

где  $h\nu$  — энергия фотона;  $mv^2 / 2$  — кинетическая энергия фотоэлектрона;  $A$  — работа выхода.

Отсюда можно определить работу выхода, скорость фотоэлектронов и постоянную Планка. При включении

задерживающего поля кинетическая энергия фотоэлектронов расходуется на преодоление сил отталкивания этого поля.

$$eU_3 = mv_{\max}^2 / 2. \quad (5)$$

$$v_{\max} = \sqrt{2eU_3} / 2. \quad (6)$$

### **Порядок выполнения работы**

1. Для проверки законов фотоэффекта: а) получите вольтамперные характеристики при двух различных диафрагмах для пяти различных светофильтров; б) определите потенциалы запираения, которые зависят только от цвета светофильтров, т.е. от длины волны.

2. По экспериментальным величинам потенциалов запираения и длинам волн (коротковолновой части пропускания светофильтра) рассчитайте скорости фотоэлектронов.

3. Используя значения потенциалов запираения для различных длин волн, рассчитайте постоянную Планка.

4. Используйте значения потенциалов запираения, измеренных для различных длин волн, и значения длин волн при построении графика зависимости  $U_3$  от  $\lambda$ . С помощью этого графика определите красную границу фотоэффекта и рассчитайте работу выхода.

5. Найдите чувствительность фотоэлемента  $\gamma = I_\phi / \Phi$  (мкА/лм), где  $I_\phi$  — ток насыщения для данной длины волны, и постройте график зависимости  $\gamma$  от  $\lambda$ .

6. Рассчитайте число фотонов, падающих на фотоэлемент через различные светофильтры, по известной силе источника и расстоянию источника от диафрагмы.

7. Зная число фотонов, рассчитайте выход электронов  $N_\phi / N_3$  для данного фотоэлемента и для различных длин волн.

### **Характеристики установки**

1. Расстояние от лампы до диафрагмы  $r = 9,5$  см.
2. Силы источника света с различными светофильтрами:

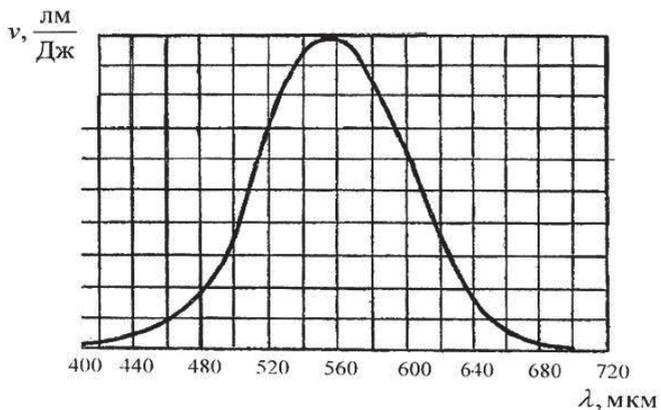
красный	$I = 5,2$ кд	$\lambda = 6,5 \cdot 10^{-7}$ м
оранжевый	$I = 15,3$ кд	$\lambda = 6,07 \cdot 10^{-7}$ м
желтый	$I = 23,8$ кд	$\lambda = 5,76 \cdot 10^{-7}$ м
зеленый	$I = 5$ кд	$\lambda = 5,46 \cdot 10^{-7}$ м
голубой	$I = 6,5$ кд	$\lambda = 4,8 \cdot 10^{-7}$ м
фиолетовый	$I = 0,68$ кд	$\lambda = 4,047 \cdot 10^{-7}$ м

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте законы фотоэффекта.
2. Какие трудности возникают при объяснении фотоэффекта с позиции волновой электромагнитной теории света?
3. Почему при увеличении напряжения на фотоэлементе ток сначала возрастает, а затем остается постоянным?
4. Что называется задерживающим потенциалом? Почему задерживающий потенциал зависит от цвета светофильтра?
5. Выведите формулы для расчета постоянной Планка и максимальной скорости фотоэлектронов.
6. Что такое красная граница и от чего она зависит?
7. Что такое чувствительность фотоэлемента? От чего она зависит?
8. Световые характеристики и единицы их измерения. Совпадают или нет световые и энергетические характеристики света? Почему?
9. Что такое выход фотоэлектронов?
10. Где используется явление фотоэффекта в сельском хозяйстве? Технике?

## Результаты измерений

Светофильтры											
красный		оранжевый		желтый		зеленый		голубой		фиолетовый	
U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I



$$V_{\lambda} = 1 \text{ для } \lambda = 5,55 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

*Кривая зависимости светового потока от длины волны в спектре  
(значения  $V_{\lambda}$  см. в таблице)*

### Значения видности

$\lambda \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$V(\lambda)$	$\lambda \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$V(\lambda)$	$\lambda \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$V(\lambda)$
4	0,0004	5,2	0,710	6,4	0,175
4,1	0,012	5,3	0,862	6,5	0,107
4,2	0,004	5,4	0,954	6,6	0,061
4,3	0,0116	5,5	0,995	6,7	0,032
4,4	0,023	5,6	0,995	6,8	0,017
4,5	0,038	5,7	0,952	6,9	0,0082
4,6	0,060	5,8	0,870	7,0	0,0041
4,7	0,091	5,9	0,757	7,1	0,0021
4,8	0,139	6,0	0,631	7,2	0,00105
4,9	0,208	6,1	0,503	7,3	0,00052
5,0	0,323	6,2	0,381	7,4	0,00025
5,1	0,503	6,3	0,265	7,5	0,00012
				7,6	0,00006

## Лабораторная работа № 2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Цель работы:

- 1) изучить закон Стефана-Больцмана;
- 2) определить постоянную Стефана-Больцмана;
- 3) познакомиться с принципом действия оптического пирометра и научиться пользоваться им.

### *Теоретическое обоснование лабораторной работы*

Излучением тел называется испускание телами в окружающее пространство электромагнитных волн. Излучение может возникать по разным причинам. Излучение, возникающее за счет внутренней энергии тел, т.е. вследствие теплового движения атомов и молекул, входящих в состав излучающего тела, называется тепловым или температурным. Тепловое излучение имеет место при любых температурах тел.

Совокупность частот (длин волн), входящих в состав излучения, называется спектром излучения. Тепловое излучение твердых и жидких тел содержит все частоты (длины волн) от  $\omega = 0$  до  $\omega \rightarrow \infty$ . Это значит, что спектр теплового излучения твердых и жидких тел является сплошным. В данной работе рассматривается излучение твердых тел.

Для описания теплового излучения используется несколько характеристик. Среди них важное значение имеют понятия спектральной плотности испускательной способности  $r_\omega$  и энергетической светимости  $R$ .

Спектральной плотностью испускательной способности  $r_\omega$  называют количество энергии, которое излучается в единичном спектральном интервале с единицы площади тела по всем направлениям за одну секунду. Если интервал излучаемых частот равен  $d\omega$  в окрестности частоты  $\omega$ , элемент поверхности, с которого происходит излучение, равен  $ds$ , время, в течение которого осуществ-

вляется излучение, равно  $dt$  и при этих условиях по всем направлениям в окружающее пространство излучается энергия  $dW$ , то

$$r_{\omega} = \frac{dW}{ds \cdot d\omega \cdot dt}. \quad (1)$$

Так как 
$$\frac{dW}{dt} = P \quad (2)$$

есть мощность, излучаемая телом, то формулу (1) можно истолковать по-другому. Можно сказать, что испускательной способностью тела называется мощность, излучаемая телом на частоте  $\omega$  в единичном спектральном интервале с единицы поверхности по всем направлениям:

$$r_{\omega} = \frac{dp}{ds \cdot d\omega}. \quad (3)$$

Испускательная способность тел при заданной температуре зависит от частоты излучения. Эту зависимость называют распределением спектральной плотности энергии в спектре излучения тела.

Для того чтобы объяснить наблюдающееся на опыте распределение энергий в спектре черного тела, Макс Планк предположил, что энергия при тепловом излучении испускается порциями, которые он назвал квантами энергии. При этом энергия одного кванта равна

$$\varepsilon = \eta \cdot \omega. \quad (4)$$

Здесь  $\eta$  — так называемая постоянная Планка,  $\eta = 1,05458 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, а  $\omega$  — циклическая частота, на которой осуществляется излучение.

Благодаря указанной гипотезе, Планку удалось получить формулу, описывающую распределение энергии по спектру излучения абсолютно черного тела. Эта формула получила название формулы Планка и имеет вид:

$$r_{\omega} = \frac{\eta\omega^3}{4\pi^2c^2} \cdot \frac{1}{\exp(\eta\omega / kT) - 1}. \quad (5)$$

Энергетической светимостью  $R$  называется количество энергии, излучаемое с единицы площади тела по всем направлениям за одну секунду во всем диапазоне излучаемых частот:

$$R = \frac{dW}{ds \cdot dt}. \quad (6)$$

Учитывая (2), можно также сказать, что энергетической светимостью называется мощность, излучаемая с единицы поверхности тела по всем направлениям во всем диапазоне излучаемых частот:

$$R = \frac{dp}{ds}. \quad (7)$$

Из определения энергетической светимости вытекает, что

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega} \cdot d\omega. \quad (8)$$

Если подставить (5) в формулу (8) и взять интеграл, то получим:

$$R = \frac{\pi^2 \cdot k^4}{60\eta^3 \cdot c^2} \cdot T^4. \quad (9)$$

Дробь, стоящая перед  $T$ , состоит из одних только констант и потому является константой. Обозначим ее:

$$\frac{\pi^2 \cdot k^4}{60\eta^3 \cdot c^2} = \sigma. \quad (10)$$

Постоянную  $\sigma$  называют постоянной Стефана-Больцмана. Ее вычисление по (10) дает  $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{К}^{-4}$ . С учетом (10) получаем:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (11)$$

т.е. энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Формула (11) получила название закона Стефана-Больцмана.

Реальные тела не являются абсолютно черными и, строго говоря, формула (11) к ним не применима. Однако во многих случаях энергетическая светимость  $R^*$  реальных тел с достаточной степенью точности пропорциональна четвертой степени температуры, и если ввести зависящий от материала нагретого тела поправочный множитель  $\gamma$ , то можно считать что

$$R^* = \gamma \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (12)$$

Коэффициент  $\gamma$  часто называют коэффициентом черноты данного материала.

Для большинства металлов  $\gamma$  зависит от температуры и принимает значения в пределах 0,1–0,3. Кроме того,  $\gamma$  для металлов сильно зависит от чистоты и качества обработки поверхности. Так, например, для вольфрама с полированной поверхностью  $\gamma = 0,15$ .

Целью нашей работы является проверка пропорциональности излучаемой мощности от четвертой степени температуры и определение  $\sigma$ . Для достижения поставленной цели воспользуемся следующим методом.

Возьмем источник излучений в виде металлической пластины, запаянной в эвакуированную стеклянную колбу и имеющей металлические выводы для включения пластины в электрическую цепь. Будем называть эту пластину рабочим телом. Включим пластину в электрическую цепь. При прохождении электрического тока в пластине будет выделяться энергия. Удельная электрическая мощность  $P_{эл}$  равна:

$$P_{эл} = J \cdot U, \quad (13)$$

где  $J$  — сила тока в пластине;  $U$  — напряжение на выводах пластины из лампы. Мощность  $P_{эл}$  частично теряется на нагревание окружающей среды путем теплопроводности и конвекции, а частично преобразуется в излучение. Отношение  $\eta$  излучаемой мощности  $P_{излуч}$  к мощности  $P_{эл}$ , выделяемой в пластине электрическим током, назовем излучательным к.п.д. лампы (пластины):

$$\eta = P_{излуч} / P_{эл}. \quad (14)$$

Из (14) излучаемая мощность может быть выражена через  $P_{эл}$  формулой

$$P_{излуч} = \eta \cdot P_{эл}. \quad (15)$$

С другой стороны, в соответствии с законом Стефана-Бермана (12), мощность  $P'$ , излучаемая телом, находящимся при температуре  $T$ , равна:

$$P' = S \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Поскольку тело находится в среде с температурой  $T_0$ , оно также получает энергию от окружающего пространства в виде излучений.

Поглощаемая мощность  $P''$  в соответствии с (12) равна:

$$P'' = S \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot T_0^4.$$

Следовательно, теряемая пластиной за счет излучений мощность равна:

$$P_{излуч} = P' - P''$$

или 
$$P_{излуч} = S \cdot \gamma \cdot \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (16)$$

Приравнивая части (15) и (16), получаем:

$$P_{излуч} = S \cdot \gamma \cdot \sigma (T^4 - T_0^4) / \eta. \quad (17)$$

В нашей работе нагретая пластина имеет температуру  $T \approx 1000$  К, а, температура окружающей среды (комнатная)  $T_0 \approx 300$  К. Отсюда следует, что  $T^4 \gg T_0^4$  и  $T_0^4$  в (17) можно пренебречь по сравнению с  $T^4$ . Тогда

$$P_{эл} = \frac{S \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot T^4}{\eta}. \quad (18)$$

Таким образом, подводимая к лампе мощность должна быть пропорциональна четвертой степени температуры пластины.

Для того чтобы проверить справедливость формулы (18), а следовательно, закона Стефана-Больцмана, необходимо независимо измерить подводимую к пластине электрическую мощность  $P_{эл}$  и температуру  $T$  пластины, а затем построить график зависимости  $P_{эл}(T)$ , которая должна быть линейной.

Теперь выразим  $\sigma$  из (18) и получим рабочую формулу для вычисления постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{J \cdot U \cdot \eta}{S \cdot \gamma \cdot T^4}. \quad (19)$$

Коэффициенты  $\eta$  и  $\gamma$  нашей установки указаны на рабочем месте.

### ***Подготовка к выполнению работы***

1. Изучить теоретический материал по библиографическому списку, прилагаемому к данным методическим указаниям.

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Решить задачи, предлагаемые к данной работе. (нечетные — 1-я бригада, четные — 2-я бригада).

4. Подготовить в тетради теоретическую часть протокола лабораторной работы.

## Описание установки

Схема установки показана на рис. 1. Установка состоит (рис. 2) из регулируемого трансформатора 2, амперметра 3, вольтметра 4, источника излучений 5 и оптического пирометра 6. Рабочим телом является вольфрамовая пластина, установленная в лампе 5. Трансформатор предназначен для питания рабочего тела лампы. При помощи амперметра 3 измеряется сила тока  $J$  лампы, а вольтметром 4 напряжение  $U$  на зажимах лампы (рабочего тела). Пирометр 6 предназначен для дистанционного измерения температуры рабочего тела. Внешний вид пирометра представлен на рис. 3. Свет от нагретого тела 1 попадает в объектив 2 прибора. В фокусе объектива находится измерительная лампа накаливания с нитью 4, изогнутой в форме дуги. Окуляр 6 позволяет одновременно видеть нить измерительной лампы и изображение накаливаемого тела, через светофильтр 5. Светофильтр 5 вырезает участок спектра излучения в окрестности длинны волны  $\lambda = 660$  нм. Измерение температуры с помощью пирометра основано на законах теплового излучения. В соответствии с формулой Планка (8), излучение нагретого тела в каком-либо спектральном интервале, в нашем случае на длине волны  $\lambda = 660$  нм, зависит от температуры. С увеличением температуры тела растет и его испускательная способность  $r_{\omega}$ . В пирометре с помощью реостата 10 регулируется ток в цепи нити накала лампы так, чтобы яркость свечения нити 4 накала измерительной лампы сравнялась с яркостью изображения светящегося тела. При этом изображение нити исчезает на фоне изображения светящегося тела. При равных яркостях светящегося тела 1 и нити 4 пирометра их температуры связаны однозначной зависимостью. Но температура нити измерительной лампы и, следовательно, яркость ее свечения однозначно определяются напряжением на зажимах измерительной лампы. Поэтому

в случае равенства яркостей нити и светящегося тела напряжение на зажимах лампы однозначно связано с температурой светящегося тела и в принципе можно проградуировать шкалу вольтметра 9 в единицах температуры светящегося тела. Такая градуировка производится при изготовлении пирометра по излучению черного тела на длине волны  $\lambda = 660 \text{ нм}$ .

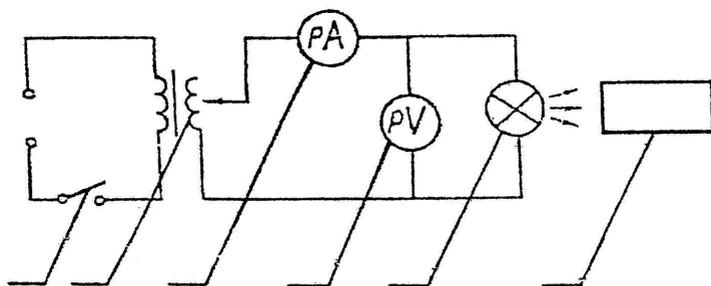


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Температура, измеренная при помощи пирометра с исчезающей нитью, называется яркостной температурой  $T_{яр}$ . Для абсолютно черных тел яркостная температура является истинной температурой тела. Излучение реальных тел отличается от излучения абсолютно черного тела, поэтому для реальных тел яркостная температура отличается от истинной температуры  $T$  тела.

Для получения истинной температуры реального тела необходимо ввести поправку по формуле

$$T = \frac{T_{яр}}{1 + T_{яр} \cdot (\kappa\lambda / 2\pi\eta c)}, \quad (20)$$

где  $\lambda$  — длина волны, на которой выполняется измерение;  
 $\alpha$  — коэффициент, зависящий от материала нагретого тела. В нашей работе  $\lambda = 66 \text{ нм}$ , а  $\alpha = 0,46$ .

Для упрощения расчетов перевод осуществить с помощью таблицы поправки:

$T_{гр}, C^{\circ}$	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1600
$T_{пл}, C^{\circ}$	840	950	1060	1170	1280	1400	1510	1740

### **Порядок выполнения работы**

1. Плавно поворачивая ручку регулирующего трансформатора, подать на рабочее тело напряжение, достаточное для поддержания красного каления пластины в лампе *1*.

2. Установить кольцо *10* (см. рис. 2, 3) примерно в среднее положение и включить тумблером *7* питание измерительной лампы.

3. Глядя в окуляр *6* и перемещая его вдоль оси пирометра, добиться четкого изображения нити пирометра.

4. Глядя в окуляр, перемещать объектив *2* вдоль оси пирометра так, чтобы получилось четкое изображение светящейся пластины.

5. Глядя в окуляр, медленно изменять яркость нити пирометра поворотом кольца *10* реостата до тех пор, пока участок нити пирометра, пересекающий изображение пластины, исчезнет на фоне светящейся поверхности пластины.

6. Записать показания амперметра и вольтметра в цепи вольфрамовой пластинки и температуру  $T$ , по шкале *9* пирометра.

7. Уменьшить ток в цепи измерительной лампы пирометра поворотом кольца *10* реостата против часовой стрелки до упора. Выключить установку.

8. Построить график зависимости излучаемой мощности от четвертой степени температуры пластины. Проверить, является ли эта зависимость линейной.

9. Вычислить для каждого опыта постоянную Стефана-Больцмана по формуле (19).

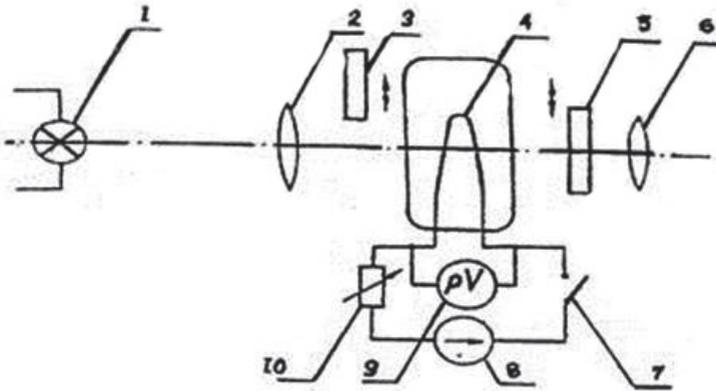


Рис. 2. Принципиальная схема пирометра

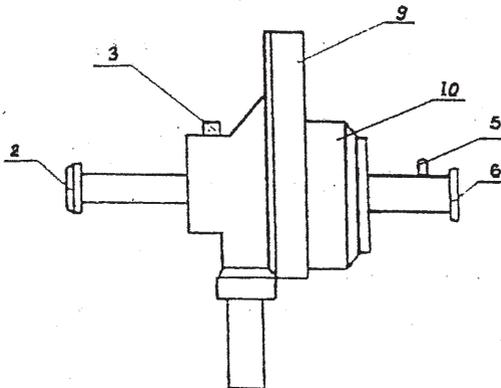


Рис. 3. Внешний вид пирометра

### Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым или температурным?
2. Поясните физический смысл энергетической светимости.
3. Что называется спектральной плотностью испускательной способности тела? Поясните ее физический смысл и связь с энергетической светимостью.

4. Какие тела называются абсолютно черными?
5. Поясните гипотезу Планка.
6. Поясните принцип действия оптического пирометра и порядок работы с ним.
7. Поясните, в чем состоит проверка правильности закона Стефана-Больцмана.

### ***Задачи к лабораторной работе***

#### **Задача 1**

Раскаленная металлическая поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$  излучает в 1 мин  $4 \cdot 10^4$  Дж. Температура поверхности 2500 К.

*Найти:*

1. Излучение этой поверхности, если бы она была абсолютно черной.
2. Отношение энергетической светимости этой поверхности и абсолютно твердого тела при данной температуре.

#### **Задача 2**

При нагревании абсолютно твердого тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменялась от 690 нм до 500 нм. Во сколько раз при этом увеличилась энергетическая светимость тела?

#### **Задача 3**

Какую мощность надо подводить к зачерненному шару радиусом 1 см, чтобы поддержать его температуру на  $27^\circ \text{C}$  выше температуры окружающей среды? Температура окружающей среды равна  $20^\circ \text{C}$ .

#### **Задача 4**

Найти, на сколько уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К и считать его абсолютно черным телом. Радиус Солнца найти в справочнике.

### **Задача 5**

Определить температуру и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны 400 нм.

### **Задача 6**

Из смотрового окошечка печи излучается световой поток 2000 Дж/мин. Определить температуру печи, если площадь отверстия 5 см<sup>2</sup>.

### **Задача 7**

Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10 кВт. Найти площадь излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности его энергетической светимости, равна 700 нм.

### **Задача 8**

Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 100 К до 3000 К.

1. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость?

2. На сколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости?

### **Задача 9**

Поверхность нагрета до температуры 1000 К. Затем одна половина этой поверхности нагревается на 100 К, другая охлаждается на 100 К. Во сколько раз изменится энергетическая светимость данного тела?

### **Задача 10**

Какое количество энергии излучает Солнце за 1 с? Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К. На сколько изменяется масса Солнца за 1 с вследствие излучения?

### **Задача 11**

Абсолютно черное тело имеет температуру 400 К. Какова будет температура тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 10 раз?

### **Задача 12**

По пластинке длиной 3 см и шириной 1 см проходит электрический ток напряжением 2 В. После установления теплового равновесия температура пластинки стала равной 1000 К. Определить силу тока, текущего по пластинке, если коэффициент поглощения пластинки  $\eta = 0,8$ .

### **Задача 13**

Температура абсолютно твердого тела увеличилась в 2 раза, в результате чего максимальная длина уменьшилась на 600 мкм. Определить начальную и конечную температуру тела.

### **Задача 14**

Какую температуру должно иметь тело, чтобы оно при температуре окружающей среды 27° С излучало в 100 раз больше энергии, чем поглощало.

### **Задача 15**

На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, имеющего температуру, равную температуре человеческого тела, примерно 37° С?

### **Задача 16**

Приняв температуру Солнца равной 6000 К, определить:

1. Мощность, излучаемую с 1 м<sup>2</sup> в 1 с.
2. Длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности.
3. Максимальную излучательную способность.

### **Задача 17**

Абсолютно черное тело находится при температуре 2900 К. В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на 9 мкм. До какой температуры охладилось тело?

### **Задача 18**

По пластинке длиной 2 см и шириной 1 см проходит электрический ток силой 10 А. После установления теплового равновесия температура пластинки 1000 К. Определить напряжение на пластинке, если коэффициент поглощения равен 0,5.

### **Задача 19**

Поток излучения абсолютно черного тела 10 кВт, максимум энергии излучения приходится на длину волны 1,5 мкм. Определить площадь излучаемой поверхности.

### **Задача 20**

Принимая температуру Солнца равной 5800 К и считая излучение абсолютно черным, вычислить уменьшение массы Солнца вследствие излучения за 1 мин. За сколько лет масса Солнца уменьшится на 0,0001 %?

### **Задача 21**

Стальной шар радиусом 5 см нагрет до температуры 1300 К. Шар остывает в открытом пространстве. За какое время температура шара понизится до 1200 К? Считать шар серым телом с поглощательной способностью, равной 0,3.

### **Задача 22**

При нагревании тела длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1,45 до 1,16 мкм. На сколько изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела?

### **Задача 23**

Стальная болванка при температуре  $927^{\circ}\text{C}$  излучает за 1 с  $8,2\text{ Дж}$  с  $1\text{ см}^2$  площади. Определить поглощательную способность этой болванки.

### **Задача 24**

Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке  $0,3\text{ мм}$ , длина спирали  $5\text{ см}$ . При включении лампочки в сеть с напряжением  $127\text{ В}$  через лампочку течет ток силой  $0,31\text{ А}$ . Найти температуру лампочки. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела  $0,31$ .

### **Задача 25**

Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум излучения переместится от красной границы видимого света ( $760\text{ нм}$ ) к его фиолетовой границе ( $380\text{ нм}$ ).

### **Задача 26**

Площадь поверхности накала нити  $60\text{-ваттной}$  вольфрамовой лампы  $0,5\text{ см}^2$ . Интегральная поглощательная способность  $0,6$ . Определить температуру нити накала.

## Лабораторная работа № 3 ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ГАЗОВ

**Цель работы:** научиться строить градуированный график по спектральным линиям известной длины волны и определять длины волн спектральных линии неизвестных газов.

**Приборы и принадлежности:** спектроскоп СЛП-2, неоновая трубка, водородная трубка, прибор для зажигания спектральных трубок «Спектр-1».

### *Теоретическое обоснование лабораторной работы*

В 1911 г. английский физик Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель строения атома, в центре которого находится тяжелое положительно заряженное ядро атома с вращающимися легкими отрицательно заряженными электронами. Модель была усовершенствована датским физиком Н. Бором. В основу теории Бора легли три постулата, позволяющие объяснить излучение и поглощение энергии атомами водорода.

Любая частица вещества характеризуется длиной волны де Бройля ( $\lambda$ ):

$$\lambda = h / p, \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad (1)$$

где  $p$  – импульс частицы;  $h$  – постоянная Планка. Пройденный путь при движении частицы по стационарной траектории должен быть кратен целому числу длин волн де Бройля ( $\lambda$ ):

$$S = n\lambda; \quad n = 1, 2, 3... \quad (2)$$

Здесь  $n$  — главное квантовое число. Подставляя (2) в (1) получаем:

$$p \cdot S = n \cdot h. \quad (3)$$

**Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний):** в атоме существуют не изменяющиеся во времени состояния. Стационарные состояния атома соответствуют стационарным орбитам. В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантовые значения момента импульса, удовлетворяющие условию (3):

$$2\pi r \cdot mv = nh, \quad (4)$$

где  $m$  — масса электрона;

$v$  — его скорость на стационарной орбите;

$r$  — радиус круговой орбиты электрона.

**Второй постулат Бора:** двигаясь по стационарной орбите, электрон не излучает энергии в виде электромагнитных волн.

**Третий постулат Бора (правило частот):** при переходе электрона с одной орбиты на другую излучается один квант энергии в соответствии с законом сохранения энергии:

$$E_1 = E + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $E_1$  — энергия стационарного состояния возбуждения атома до излучения;  $E$  — энергия после излучения. При этом происходит переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т.е. переход электрона с более удаленной на близлежащую орбиту. При помощи поглощения фотона с энергией  $\varepsilon$  (переход в состояние с большей энергией, т.е. переход электрона на более удаленную от ядра орбиту) выполняется закон сохранения энергии:

$$E_2 = E_1 + \varepsilon, \quad (6)$$

где  $E_1$  — энергия атома до поглощения;  $E_2$  — энергия атома после поглощения. Набор всех переходов электронов в оболочке атома определяет линейчатый спектр.

Центростремительной силой  $F$ , удерживающей электрон на орбите радиусом  $r$ , является кулоновская сила  $F_{\kappa}$  притяжения между электроном и ядром, которая уравновешивается центробежной силой  $F_{\psi}$ :

$$F_{\psi} = F_{\kappa}, \quad F_{\psi} = mv^2 / r : \quad F_{\kappa} = e^2 Z / 4\pi\epsilon_0 r^2;$$

$$\epsilon_0 = 0,82 \cdot 10^{-12} \Phi / \text{м}; \quad \epsilon = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}, \quad (7)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;

$Z_e$  — заряд ядра;

$e$  — заряд электрона.

Решая совместно уравнения (7) и (4), получаем формулу для радиусов  $r$  стационарных орбит атома:

$$r = n^2 \epsilon_0 h^2 / \pi m e z. \quad (8)$$

Скорость движения электрона на стационарной орбите определяем на основе формул (8) и (4):

$$v = e^2 Z / 2\pi\epsilon_0 h. \quad (9)$$

Полная энергия  $E$  электрона на стационарной орбите в атоме равна сумме его кинетической и потенциальной энергии:

$$E = mv^2 / 2 - e^2 Z / 4\pi\epsilon_0 r. \quad (10)$$

Подставляя в формулу (10) значение  $r$  из (8) и  $v$  из (9), находим  $E$  зависимости от квантового числа  $n$ :

$$E = m e^4 Z^2 / 8 \epsilon^2 h^2 n^2. \quad (11)$$

Выведем общую формулу для частоты  $\nu$  излучения атома, подставим выражение энергии (11) в закон сохранения энергии (5) и найдем энергию фотона:

$$h\nu = \frac{mZ^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (12)$$

где  $n_1$  порядковый номер орбиты, с которой уходит электрон;  $n_2$  — порядковый номер орбиты, на которую уходит электрон. Постоянный множитель, стоящий в правой части формулы (12), равен постоянной Ридберга  $R$  для атома водорода ( $Z = e$ ):

$$R = me^4 / 8\varepsilon_0^2 \cdot h^2.$$

Теперь формулу (12) с учетом связи энергии фотона  $\varepsilon$  с частотой:

$$\varepsilon = h\nu \tag{13}$$

можно записать в следующем виде:

$$\nu = R \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \tag{13г}$$

При  $n_1 = 1$  и  $n_2 = 2, 3, 4\dots$  формула (13') дает серию Лаймана, при  $n_1 = 2$  и  $n_2 = 2, 3, 4\dots$  — серию Бальмера, при  $n_1 = 3$  и  $n_2 = 4, 5, 6\dots$  — серию Пашена.

Так как газ состоит из множества различно возбужденных атомов, то в нем одновременно совершаются возможные типы переходов электрона. В спектре излучения водорода одновременно представлены линии всех серий при условии, что атомы все время возбуждаются посредством какого-либо внешнего источника. Образование спектральных серий Лаймана, Бальмера и Пашена изображено на рис. 1.

Для изучения спектров обычно используют спектроскоп (рис. 2).

Свет от источника  $1$  попадает на входную щель  $2$  спектроскопа. После щели расходящийся пучок света проходит через объектив  $3$  и превращается в параллельный пучок. Этот пучок проходит через призму  $4$ , разлагается в спектр. Далее пучок света рассматривается наблюдателем  $б$  через окуляр  $5$ . В поле зрения окуляра попадает

небольшой участок длин волн. Спектр по мере надобности перемещается путем поворота призмы 4 с помощью маховика. После каждого поворота маховика к показаниям необходимо прибавлять 100 единиц.

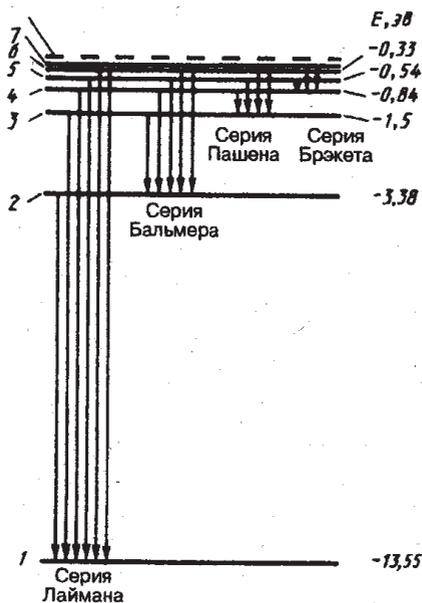


Рис. 1. Схема энергетических уравнений в спектре водорода:  
1 — ультрафиолетовая серия; 2 — видимая серия; 3, 4, 5 — инфракрасные серии

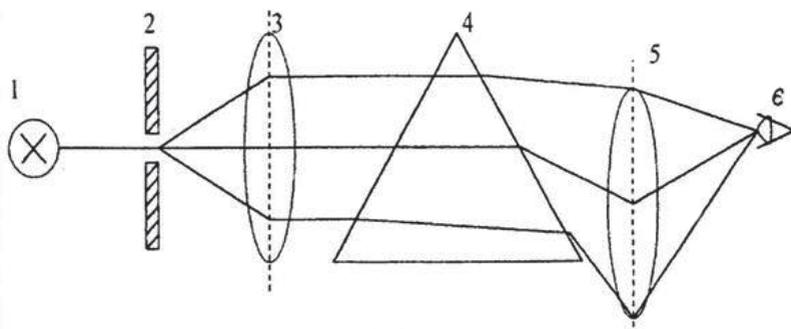


Рис. 2. Оптическая схема лабораторной установки

Характеристический спектр неона

Цвет линий	Длина волны	Число оборотов маховика	Показания шкалы маховика
Красный	640		
Оранжевая	614		
Желтая	585		
Зеленая	540		
Голубая	471		
Фиолетовая			

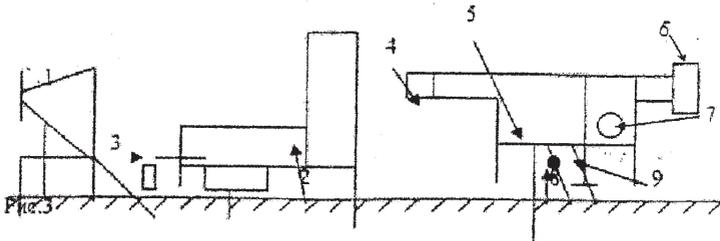


Рис. 3. Схематический вид установки

Спектроскоп состоит из металлического корпуса 5, на котором находится маховик 7 и окуляр 6 с накатанным кольцом наводки на резкость. На рукоятке 9 имеется кнопка 8 для включения прибора «Спектр-1» 2. Неоновая разрядная лампа 1 помещена в кожух, связана кабелем с блоком питания. Для совмещения окна прибора «Спектр-1» со щелью 4 спектрометра используется рукоятка 3.

### Порядок выполнения работы

1. Включите в сеть источник питания прибора «Спектр-1». Нажав кнопку 5 на спектрометре, зажгите неоновую трубку. При необходимости рукояткой 3 совместите окно прибора «Спектр-1» со щелью спектрометра.

2. Медленно вращая маховик 7 от крайнего правого положения, совместите наиболее яркую зеленую линию в спектре неона с острием указателя в окуляре. Отсчитай-

те положения этой линии по шкале маховика. Занесите результат в табл. 1.

3. Определяя из табл. 1 цвет линий, совместите (путем вращения маховика) другие линии в спектре неона указателя в окуляре. Отметьте положения каждой линии по шкале маховика. Занесите результат в табл. 1.

4. Отключите неоновую лампу.

5. Взяв из табл. 1 значения длин волн неона и соответствующие им значения на маховике, постройте градуировочную кривую, откладывая по оси абсцисс значения по шкале маховика, а по оси ординат — значения длин волн.

6. Нажав кнопку  $\delta$  на спектро스코пе, замените неоновую трубку на водородную.

7. С помощью рукоятки  $З$  совместите окно прибора «Спектр-1» со щелью спектроскопа.

8. Медленно вращая маховик от крайнего правого положения, совместите с указателем в окуляре наиболее яркие спектральные линии, определяя их цвет из табл. 2.

9. Отметьте положение этих спектральных линий по шкале маховика и результаты занесите в табл. 2.

10. Найдите по градуировочному графику длины волн молекулы водорода для спектральных линий, указанных в табл. 2.

11. Вычислите значения  $n_1$  и  $n_2$  для наблюдавшихся вами длин волн в атоме водорода.

### ***Контрольные вопросы***

1. Объясните строение атома водорода.
2. Сформулируйте постулаты Бора и выведите формулу для спектра атома водорода.
3. Каков физический смысл постоянной Ридберга?
4. Что такое спектр испускания и спектр поглощения?
5. Что такое энергия возбуждения и энергия ионизации?

6. Принцип работы спектроскопа.

7. В чем состоит градуировка спектроскопа? Для чего она проводится?

8. Напишите формулы для всех известных серий спектров водорода.

*Таблица 2*

**Спектральные линии атома водорода**

Цвет линий	Зеленая	Желтая	Красная
Показание шкалы маховика с учетом числа оборотов			
Длина волны			

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савельев И. В.* Курс физики. — СПб.: Лань, 2006. — 467 с.
2. *Трофимова Т. И.* Курс физики. — М.: Высш. шк., 2003. — 542 с.
3. *Детлаф А. А.* Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. — М.: Высш. шк., 1989. — 607 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Лабораторная работа № 1	
Исследование внешнего фотоэффекта .....	4
Лабораторная работа № 2	
Изучение закона Стефана-Больцмана.....	10
Лабораторная работа № 3	
Изучение спектров газов.....	25
Библиографический список .....	33

Составители:  
Дзю Искра Михайловна  
Викулов Станислав Викторович  
Чечуев Владимир Яковлевич  
Алешкевич Марина Георгиевна

## **ФИЗИКА**

---

### **ОПТИКА**

Методические указания  
к лабораторным работам

Редактор Т.К. Коробкова  
Компьютерная верстка Н.С. Пияр

Подписано в печать 19 сентября 2013 г. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ .  
Объем 1,7 уч.-изд. л., 2,25 усл. печ. л.  
Тираж 100 экз. Изд. № 66. Заказ № 922

---

Отпечатано в Издательстве  
Новосибирского государственного аграрного университета  
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.  
Тел./факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru