

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ШБИП
_____ Д.В. Чайковский
_____ 2018 г.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Методические указания к выполнению лабораторной работы О-05
по разделу «Оптика» курса «Общей физики»
для студентов всех специальностей

УДК 531

Изучение закона Стефана – Больцмана. Методические указания к выполнению лабораторной работы О-05 по разделу «Оптика» курса «Общей физики» для студентов всех специальностей.

Томск, изд. ТПУ 2018. – 12 с.

Составитель: Н.С. Кравченко, В.В. Шамшутдинова

Рецензент:

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром отделения естественных наук.

Директор ШБИП

Д.В. Чайковский

« ____ » _____ 2018г.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Приборы и принадлежности: термостолбик, источник питания, универсальный усилитель, лампа с нитью накаливания, распределительная коробка, резистор, оптическая скамья, цифровые мультиметры.

Цель работы: исследовать зависимость энергетической светимости нити накала лампы от температуры, рассмотреть законы излучения абсолютно черного и серого тел.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела, называется **тепловым излучением**. Тепловое излучение, самое распространенное в природе, происходит за счет теплового движения атомов и молекул и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры.

Если энергия, расходуемая телом на тепловое излучение, не восполняется за счет соответствующего количества теплоты, подводимого к телу, то его температура постепенно понижается, а тепловое излучение уменьшается.

Тепловое излучение – единственное излучение, способное находиться в термодинамическом равновесии с веществом. В теплоизолированной (адиабатически изолированной) системе температура тела остается постоянной. Т.е. в состоянии термодинамического равновесия энергия, расходуемая каждым из тел системы на тепловое излучение, компенсируется таким же количеством поглощенной энергии падающего на тело излучения.

Энергетические характеристики теплового излучения

1. Интегральные характеристики используют при учете полной энергии излучения во всем диапазоне длин волн (частот), испускаемых телом.

Потоком излучения Φ называют энергию, излучаемую телом за единицу времени во всех направлениях, т.е. мощность излучения тела.

Энергетическая светимость R_T – это поток излучения с единицы площади поверхности тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π во всем диапазоне длин волн (частот). Энергетическая светимость является функцией температуры T и

$$\Phi = \int R_T dS. \quad (1)$$

2. Спектральные характеристики служат для описания распределения энергии излучения по длинам волн (частотам).

Излучение является совокупностью электромагнитных волн различных длин (частот). Обозначим поток излучения, испускаемый единицей поверхности тела в

интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ (от ω до $\omega + d\omega$) через R_λ (R_ω).

Спектральной плотностью энергетической светимости (испускательной способностью) называют отношение потока излучения, испускаемого в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ (от ω до $\omega + d\omega$) с единицы поверхности тела, к ширине интервала:

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_\lambda}{d\lambda} \quad \text{или} \quad r_{\omega,T} = \frac{dR_\omega}{d\omega}.$$

Испускательная способность, таким образом, есть мощность излучения с единицы площади в единичном интервале длин волн (частот). Она зависит от длины волны (частоты) испускаемых телом электромагнитных волн, температуры тела, химического состава и состояния поверхности.

Энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости связаны соотношением

$$R_T = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda = \int_0^\infty r_{\omega,T} d\omega. \quad (2)$$

Спектральный коэффициент поглощения (излучения) (поглощательная способность) показывает, какая доля падающего потока $d\Phi_{\text{пад}}$ поглощается телом в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ (от ω до $\omega + d\omega$):

$$a_{\lambda,T} = \frac{d\Phi_{\text{пол}}}{d\Phi_{\text{пад}}}.$$

Остальное излучение отражается или проходит сквозь тело. Поглощательная способность тела зависит от длины волны (частоты) поглощаемых телом электромагнитных волн, температуры тела, химического состава и состояния поверхности (шероховатость, окислы и т.д.).

По определению поглощательная способность $a_{\lambda,T}$ не может быть больше единицы. Тело называется **абсолютно черным (АЧТ)**, если оно при любой температуре полностью поглощает всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их длины волны (частоты) и направления падения. Следовательно, коэффициент поглощения абсолютно черного тела равен единице, $(a_{\lambda,T})^{\text{АЧТ}} = 1$, для всех длин волн (частот) и температур. Тело, называется **серым**, если его поглощательная способность одинакова для всех длин волн (частот) и зависит только от температуры, химического состава тела, состояния поверхности и $a_{\lambda,T} = f(T) < 1$.

Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа: отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности (в том числе и для абсолютно черного тела) не зависит от материала и состояния поверхности тела и является универсальной функцией длины волны (частоты) и температуры (функцией Кирхгофа):

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_3 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{\text{АЧТ}} = \dots = f(\lambda, T). \quad (3)$$

Величины $r_{\lambda,T}$ и $a_{\lambda,T}$ могут меняться при переходе от одного тела к другому, отношение же их оказывается одинаковым для всех тел.

Для АЧТ $(a_{\lambda,T})^{АЧТ} = 1$, поэтому из закона Кирхгофа

$$f(\lambda, T) = (r_{\lambda,T})^{АЧТ}. \quad (4)$$

Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$ есть испускательная способность АЧТ. Так как для всех тел, кроме АЧТ, $a_{\lambda,T} < 1$, то

$$r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot (r_{\lambda,T})^{АЧТ} < (r_{\lambda,T})^{АЧТ}, \quad (5)$$

т.е. из всех тел максимальной испускательной способностью (и максимальной энергетической светимостью) при данной температуре обладает АЧТ.

Кроме того, из закона Кирхгофа следует, что чем больше тело поглощает на некоторой длине волны, тем больше будет излучать на данной длине волны, будучи нагретым.

Следовательно, знание аналитического вида функции $(r_{\lambda,T})^{АЧТ}$ (4) открывает возможность рассчитать энергетическую светимость $r_{\lambda,T}$ (5) для любого тела, если известна его поглощательная способность $a_{\lambda,T}$, измеряемая экспериментально.

Закон излучения Планка. Макс Планк, исходя из предположения о квантовой природе излучения, нашел для функции $(r_{\lambda,T})^{АЧТ}$ (4) следующее выражение

$$\begin{aligned} (r_{\lambda,T})^{АЧТ} &= \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda k T}\right) - 1} \quad \text{или} \\ (r_{\omega,T})^{АЧТ} &= \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{k T}\right) - 1} \end{aligned} \quad (6)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $\hbar = h/(2\pi)$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

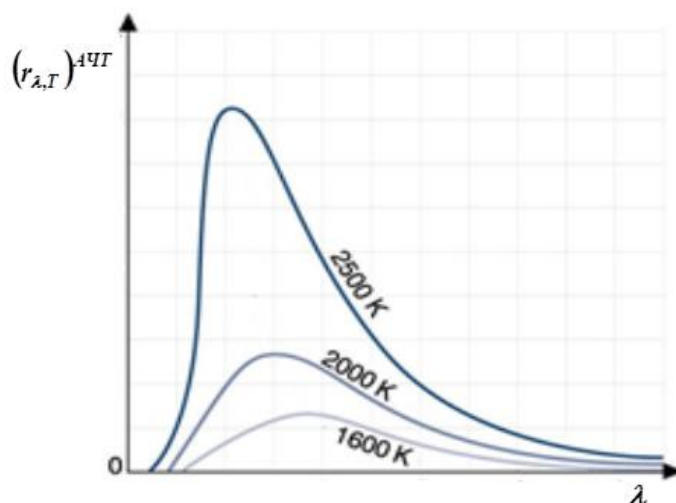


Рис. 1 Испускательная способность АЧТ

При постоянной температуре зависимость (6) описывает распределение энергии излучения АЧТ по длинам волн (частотам) (см. рис. 1).

Закон смещения Вина. Как видно из рис. 1, основная энергия излучается в довольно узком интервале длин волн, от положения которого на оси зависит цвет нагретого тела. Вильгельм Вин теоретически установил, что для АЧТ максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны, обратно пропорциональную температуре: $\lambda_{\max} T = b$, где $b = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{К}$. Таким образом, при повышении температуры максимум спектральной плотности излучения смещается в область более коротких длин волн.

Закон Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость АЧТ (2) равна площади, ограниченной кривой зависимости (6) и осью абсцисс, и по закону Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени температуры:

$$(R_T)^{AЧТ} = \int_0^{\infty} (r_{\lambda,T})^{AЧТ} d\lambda = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Излучение реальных тел

Реальные тела в основном являются **селективными** телами, т.к. коэффициент поглощения реальных тел зависит и от длины волны (частоты) падающего на тело излучения и от температуры: $a_{\lambda,T} = f(\lambda, T)$. Тем не менее, многие тела при нагревании излучают непрерывный спектр, форма которого близка к спектру излучения АЧТ. К их числу в отдельных диапазонах можно отнести твердые тела с шероховатой поверхностью. Такие тела являются серыми (неселективными излучателями). Так как для серого тела спектральный коэффициент излучения меньше единицы и не зависит от λ ,

$$a_{\lambda,T} \equiv a_T, \quad (8)$$

то кривая спектрального распределения энергии серого тела аналогична кривой распределения энергии АЧТ при той же температуре T (см. рис. 2).

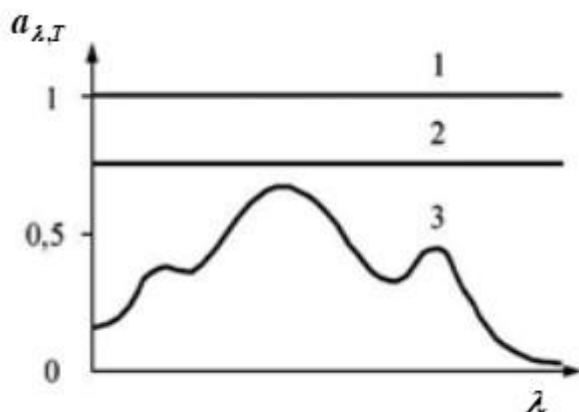


Рис. 2 Спектральный коэффициент поглощения 1 – АЧТ, 2 – серого тела, 3 – реального тела

К серым телам можно отнести железо, сажу, графит, некоторые краски. Практически "серым" телом является пламя углеводородов, например, ацетилена.

Энергетическая светимость серого тела выражается через энергетическую светимость АЧТ согласно (2), (5) и (7), (8):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = a_T \int_0^{\infty} (r_{\lambda,T})^{A_{\text{ЧТ}}} d\lambda = a_T \sigma T^4. \quad (9)$$

Таким образом, различие в интенсивности серого (или любого реального) тела и АЧТ можно учитывать введением **интегрального коэффициента поглощения (излучения)** a_T . Этот коэффициент также называют **степенью черноты**. Он равен отношению энергетической светимости данного тела к энергетической светимости АЧТ, имеющего ту же температуру, что и тело:

$$a_T = \frac{R_T}{(R_T)^{A_{\text{ЧТ}}}}.$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

В данной работе изучается зависимость потока излучения серого тела (вольфрамовой нити лампы накаливания) от его температуры.

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 3.

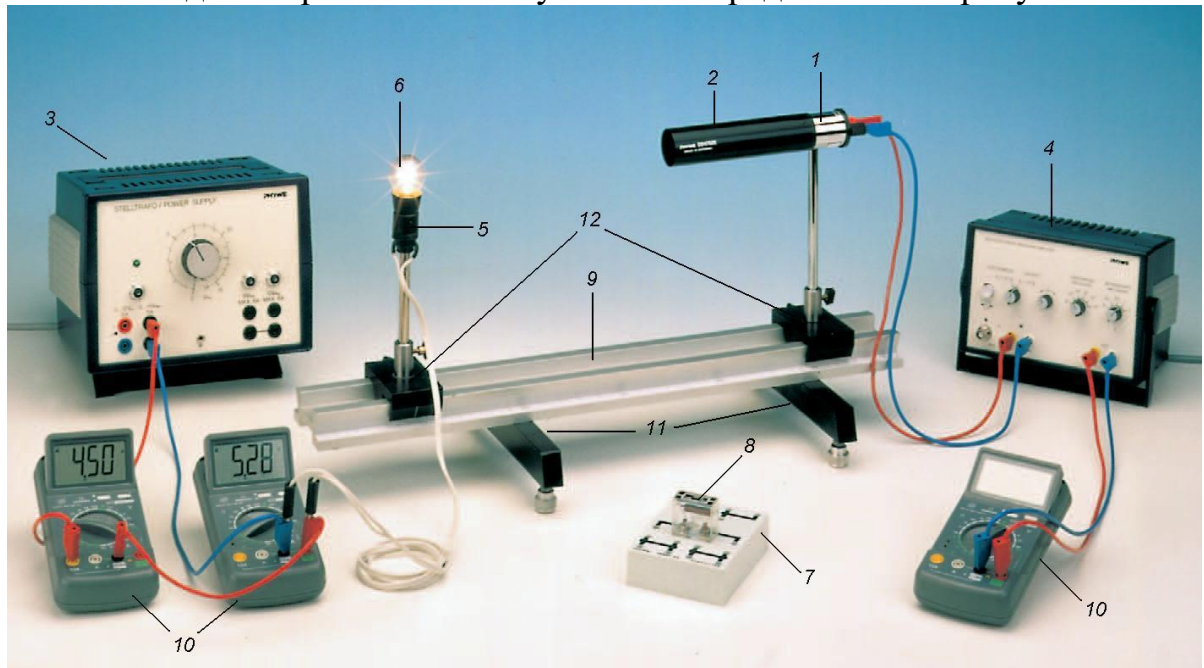


Рис. 3 Экспериментальная установка

В состав экспериментальной установки входят: 1 – термоэлемент, 2 – экранирующий тубус, 3 – источник питания, 4 – универсальный усилитель, 5 – держатель лампы на стержне, 6 – лампа с нитью накаливания, 7 – распределительная коробка, 8 – резистор в кожухе, 9 – оптическая скамья, 10 – цифровые мультиметры, 11 – основание для оптической скамьи, 12 – подвижное соединение для скамьи.

Лампа (6), служащая источником теплового излучения, подключена к источнику питания (3). Сопротивление лампы в рабочем состоянии находят по закону Ома, измерив вольтметром (10) напряжение на лампе и амперметром (10) – силу тока. По результатам измерения сопротивления, зависящего от температуры нити, находят температуру нити накала.

Изменение интенсивности теплового излучения лампы регистрируют приемником теплового излучения (термостолбиком (2)), к которому подключен мультиметр (10) через усилитель (4). Термостолбик представляет собой батарею последовательно соединенных термопар. Основа термопары – это два провода из различных металлов, в местах контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов (горячий спай) нагревает поток теплового излучения. Вторые концы термопары (холодный спай) поддерживаются при постоянной температуре и соединены с регистрирующим мультиметром (10). Действие термопары основано на эффекте Зеебека: возникновение термоЭДС в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников при различных температурах контактов.

Определение температуры нити накала

В данной работе температуру нити накала лампы определяют омическим методом, используя зависимость сопротивления проводника от температуры. Также возможно использование оптических пирометров – яркостный метод. Сопротивление большинства металлов с температурой изменяется по закону

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T),$$

где R_0 – сопротивление металла при нулевой температуре, T – температура по шкале Кельвина. Для вольфрама $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Следовательно, по результатам измерений сопротивления нити накала в нагретом состоянии можно рассчитать ее температуры T по шкале Кельвина:

$$T = \frac{R(T) - R_0}{\alpha R_0}. \quad (10)$$

Сопротивление нити лампы $R(T)$ можно рассчитать по закону Ома: $R(T) = \frac{U}{I}$. Сопротивление нити R_0 можно определить, зная сопротивление лампы при комнатной температуре $R_{\text{комн}} = \frac{U}{I}$:

$$R_0 = \frac{R_{\text{комн}}}{1 + \alpha(t_{\text{комн}} + 273)}. \quad (11)$$

Определение потока излучения вольфрамовой нити

Термостолбик – неселективный приемник энергии (в отличие от фотоэлемента). Его показания определяются только количеством падающей энергии и не зависят от спектрального состава потока тепловой энергии.

Количество энергии, излучаемое в единицу времени с поверхности S_0 нити накала лампы (см. рис. 4)), согласно (1), равно

$$\Phi_0^{\text{изл}} = R_0 S_0.$$

На поверхность термоэлемента площадью S_1 , находящегося на расстоянии r от нити лампы, падает доля этой энергии

$$\Phi_1^{nad} = \Phi_0^{изл} \frac{S_1}{4\pi r^2} = R_0 S_0 \frac{S_1}{4\pi r^2}.$$

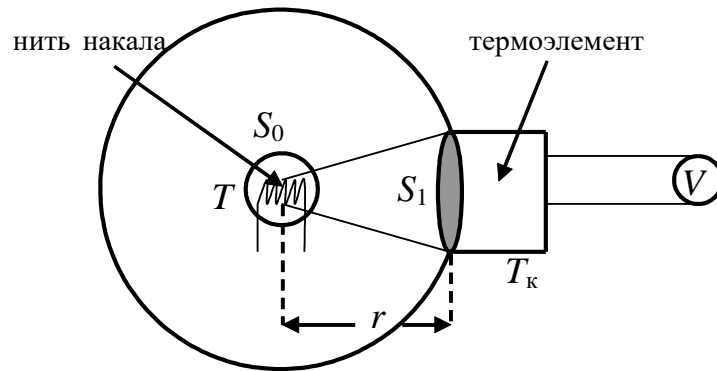


Рис. 4 Нить накала лампы и термоэлемент

Термоэлемент поглощает часть этой энергии (коэффициент поглощения термостолбика обозначим a_1):

$$\Phi_1^{ногл} = a_1 \Phi_1^{nad} = a_1 R_0 S_0 \frac{S_1}{4\pi r^2}$$

и генерирует напряжение U , величина которого пропорциональна потоку излучения $\Phi_1^{ногл}$:

$$U = k_1 \Phi_1^{ногл} = k_1 a_1 R_0 S_0 \frac{S_1}{4\pi r^2},$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности.

Для реального тела, согласно (9), справедливо

$$U = k_1 a_1 (a_T \sigma T^4) S_0 \frac{S_1}{4\pi r^2}.$$

Обозначим величины, не зависящие от температуры, как $C = k_1 a_1 \sigma S_0 \frac{S_1}{4\pi r^2}$. Тогда

$U = C a_T T^4$. Логарифмирование обеих частей равенства приводит к выражению

$$\ln \frac{U}{a_T} = 4 \ln T + \ln C.$$

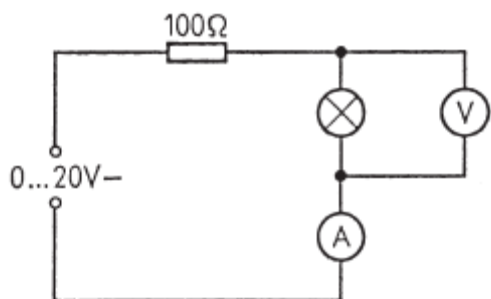
Для АЧТ $a_T = 1$ при любой температуре. Зависимость $\ln U (\ln T)$ является линейной и график функции $\ln U = f(\ln(T))$ представляет собой прямую с коэффициентом наклона равным 4. В данной работе рабочим телом является вольфрамовая нить накала. Зависимость степени черноты a_T вольфрама от температуры изменит угловой коэффициент экспериментальной прямой. Целью лабораторной работы является установление показателя степени температурной зависимости для вольфрамовой лампы накаливания, аналогичной закону Стефана-Больцмана.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I. Определение R_0 .

1. Собрать цепь согласно схеме 1, состоящую из источника **постоянного тока** (клеммы **DC** на источнике питания 3), резистора (8) 100 Ом, включенного последовательно с лампой посредством распределительной коробки (7).

2. Перевести вольтметр и амперметр в режим **постоянного тока** (отсутствие символа **AC** на табло). Установить малые значения тока I (от 50 мА до 150 мА). Определить значения падения напряжения U_L на нити лампы. Записать показания термометра $t_{\text{комн}}$ в лаборатории.



3. Рассчитать значения сопротивления нити лампы $R_{\text{комн}}$ по закону Ома и R_0 по формуле (11). Определить среднее значение R_0 .

Схема 1

Таблица 1. Результаты измерений и расчет R_0 .

№	I , мА	$t_{\text{комн}}$, °C	U_L , В	$R_{\text{комн}}$, Ом	R_0 , Ом	сред. зн. R_0 , Ом
1						
2						

II. Определение T и U .

1. Собрать цепь, согласно схеме 2. Лампа питается от источника **переменного тока** (клеммы **AC** на источнике питания 3), величину который можно измерять амперметром (режим **AC** на табло). Вольтметр подсоединить параллельно лампе.

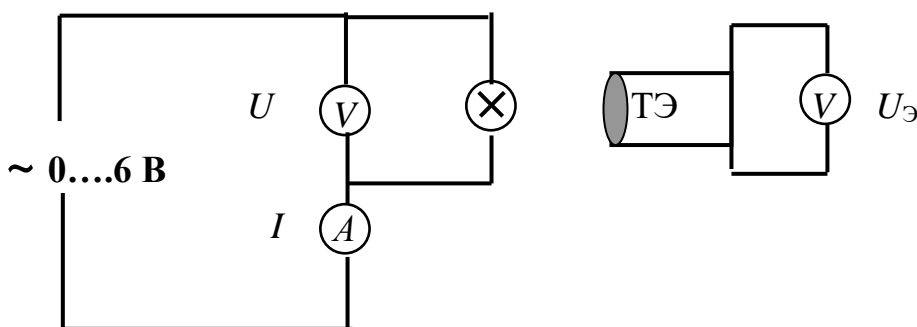


Схема 2

Величина термоэдс U , возникающая на термоэлементе, порядка нескольких милливольт, поэтому для повышения точности измерений необходимо использовать усилитель. Коэффициент усиления должен быть установлен на 10^3 при работе с вольтметром в диапазоне 0 – 20 В.

2. Установить термоэлемент на расстоянии $r=20$ см от лампы (для удобства отсчета в основаниях держателей имеются насечки).

3. Провести предварительную **коррекцию «нуля»**. При выключенной (холодной) лампе установить переключатель усилителя в режим LOW DRIFT (10^4 Ом) с постоянной времени 1 с. Поворотом ручки добиться показаний U близких к нулю.

4. Настроить установку. Для этого подать на лампу питание в 1 В переменного тока. Слегка поворачивая тубус с термоэлементом вправо и влево, найти положение с наибольшим значением термоэдс. Ось нити накаливания должна быть перпендикулярна оси оптической скамьи.

5. Изменяя напряжение на лампе U_L с шагом в 0,5 В от 1 В до 6 В, определить значения силы тока I (А), протекающего по спирали лампы, и термоэдс U термостолбика (мВ). Уменьшая напряжение на лампе U_L с шагом в 0,5 В от 6 В до 1 В, повторить измерения. Показания термоэдс U регистрировать после того, как *показания вольтметра стабилизируются* (порядка 0,5 минуты).

Таблица 2. Результаты измерений и расчет T и U .

$r = \underline{\hspace{2cm}}$

U_L , В	I , А	I , А	I_{cp} , А	$R(T)$, Ом	T , К	$\ln T$	U , мВ	U , мВ	U_{cp} , мВ	$\ln U_{cp}$

III. Определение T и U при увеличенном расстоянии.

Провести измерения согласно пункту II для $r=22$ см. Результаты измерений занести в таблицу 3, подобную таблице 2.

IV. Обработка результатов измерений.

- В таблицах 2 и 3 рассчитать сопротивление нити накала по закону Ома для среднего значения тока.
- Вычислить температуру накала нити (см. (10)) и $\ln T$, используя среднее значение R_0 из таблицы 1.
- Вычислить логарифм среднего напряжения на термостолбике.
- По данным таблиц 2 и 3 построить зависимости $\ln U$ ($\ln T$) на одном графике.
 - Определить тангенс угла наклона получившихся прямых.
 - Определить тангенс угла наклона получившихся прямых без учета отрицательных значений логарифма U .
- Сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа теплового излучения?

Каков механизм возникновения теплового излучения?

2. Дайте определения: а) энергетической светимости; б) спектральной плотности энергетической светимости; в) спектральному коэффициенту поглощения .

3. Как энергетическая светимость связана с испускательной способностью?

4. Что такое абсолютно черное тело? Серое тело?

5. Дайте формулировку закона Кирхгофа. Для каких тел он справедлив?

6. Какой формулой описывается спектральное распределение АЧТ в зависимости от длины волны и температуры? Какая идея (гипотеза) позволила вывести эту формулу?

7. Нарисуйте кривую распределения энергии в спектре абсолютно черного тела в зависимости от длины волны для нескольких разных температур и укажите на графике, что собой представляет энергетическая светимость.

8. В чём состоит закон Стефана-Больцмана? Как его получить из формулы Планка? Почему он не выполняется для реальных тел?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: – КноРус. – 2009. – 1856с.

2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука. – 1976. – С. 682 – 701.

3. Физические величины: Справочник/А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: – Энергоатомиздат. – 1991. – 1232с.

4. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: – «Энергия». – 1974. – 472с.

5. П.В. Пошехонов, Э. И. Соколовский Тепловой расчет электронных приборов. М.: – Высшая школа. – 1977. – 156с.

6. Политехнический терминологический толковый словарь. М.: – Словарное издательство ЭТС. – 2008.