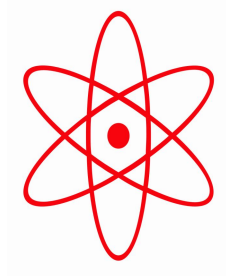


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОР-
НОЙ РАБОТЫ



ФКЛ-15

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СВИТИМОСТИ НАГРЕТОГО
ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.**

Тула, 2015 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СВЕТИМОСТИ НАГРЕТОГО ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Цель работы: исследование зависимости энергетической светимости вольфрамового элемента лампы накаливания от температуры. Оценка постоянной Стефана – Больцмана. Исследование закона смещения Вина.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Тепловое излучение.

Поток световой энергии, падающий на поверхность непрозрачного тела, частично отражается, а частично поглощается. Поглощаемая энергия преобразуется в иные формы энергии, чаще всего в энергию теплового движения. Поэтому тела, поглощающие лучи, нагреваются. Тело, нагретое до температуры большей, чем температура окружающей среды, отдает теплоту в виде излучения электромагнитных волн (непрерывный спектр). Такое излучение называется тепловым (температурным). Таким образом, тепловое равновесное излучение осуществляется за счет энергии хаотического движения частиц тела.

Обозначим через *светимость* количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в одну секунду по всем длинам волн (иначе эта величина называется еще *интегральной плотностью излучения, интегральная энергетическая светимость*)

$$R = \frac{E_{\text{изл}}}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где $E_{\text{изл}}$ — полная энергия, излучаемая телом, S — площадь излучающей поверхности, t — время, размерность $[R_T] = \text{Дж/м}^2 \cdot \text{с} = \text{Вт/м}^2$

Измерения показывают, что энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускают нагретыми телами. Энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности тела в единичном интервале длин волн, называется **монохроматической (дифференциальной) плотностью излучения** или иначе **излучательной способностью тела**.

$$r_{\lambda T} = \frac{dE_{\text{изл}}}{dS \cdot t \cdot d\lambda} \quad (2)$$

Из определения вытекает связь между *светимостью* и *излучательной способностью* тела:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda \quad (3)$$

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдается поглощение, отражение и пропускание энергии. Величина, равная отношению энергии *поглощенного* света к энергии *падающего*, называется **коэффициентом поглощения** или **поглощающей способностью** тела

$$\alpha = \frac{E_{\lambda \text{ погл}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (4)$$

Величина, равная отношению энергии *отражённого* света к энергии *падающего* называется **коэффициентом отражения** или **отражательной способностью** тела. Коэффициент безразмерный и показывает, *какую долю падающего излучения* в интервале длин волн λ тело *отражает*

$$\rho = \frac{E_{\lambda \text{ отр}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (5)$$

Величина, равная отношению энергии света, *прошедшего* через данное тело (среду) ко всей *падающей* энергии, называется **коэффициентом пропускания**

$$\tau = \frac{E_{\lambda \text{ прох}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (6)$$

Коэффициент пропускания характеризует прозрачность тела по отношению к падающему излучению. Измерения показывают, что коэффициенты **поглощения** (α), **пропускания** (τ) и **отражения** (ρ) тела зависят не только от длины волны падающего излучения, но и от температуры тела, то есть

$$\alpha = f_{\alpha}(\lambda, T); \quad \tau = f_{\tau}(\lambda, T); \quad \rho = f_{\rho}(\lambda, T). \quad (7)$$

Для монохроматического излучения они называются **спектральными коэффициентами поглощения, пропускания и отражения** и обозначаются

$$\alpha_{\lambda, T}, \quad \tau_{\lambda, T}, \quad \rho_{\lambda, T}.$$

Таким образом, для монохроматического потока введем характеристику поглощения тела (**спектральная поглощательная способность**) — отношение поглощенного потока $d\Phi_{\lambda, T}^{\text{погл}}$ к величине падающего потока $d\Phi_{\lambda, T}^{\text{пад}}$:

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{d\Phi_{\lambda, T}^{\text{погл}}}{d\Phi_{\lambda, T}^{\text{пад}}}$$

Спектральные лучеиспускающая и поглощательная способности тела зависят от длины волны падающего излучения, температуры тела, а также от свойств тела и его поверхности.

Тело, у которого $\alpha_{\lambda, T} = 1$ для всех длин вели, называется **абсолютно черным**. Если спектральная поглощательная способность тела в некоторой области длин волн постоянна ($\alpha_{\lambda, T} < 1$), тело в этой области спектра считается **серым**. Абсолютно черное тело (АЧТ) (точнее, абсолютно поглощающее) - полностью поглощает все падающие на него излучения любой длины волны при любой температуре.

Коэффициент поглощения АЧТ для всех длин волн при любых температурах равен единице, а коэффициент отражения равен нулю.

В природе не существует тел, совпадающих по свойствам с абсолютно чёрным. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью, приближаются по своим свойствам к абсолютно чёрным в ограниченном интервале длин волн. Реальные тела, называемые чёрными, поглощают хорошо только излучения видимой области спектра.

Тем не менее, можно указать на тело, которое по своим свойствам практически не будет отличаться от абсолютно чёрного тела — это *очень малое отверстие в некоей полости*. Луч любой длины волны, попавший внутрь такой полости, может выйти из нее только после многократных отражений. При каждом отражении от стенок полости часть энергии луча поглощается и лишь ничтожная доля энергии лучей, попавших в отверстие, сможет выйти обратно; поэтому коэффициент поглощения *отверстия* оказывается весьма близким к единице. Такая модель абсолютно черного тела может быть нагрета до высоких температур. Тогда из отверстия в полости выходит интенсивное излучение, и отверстие будет ярко светиться (при этом оно по-прежнему остается абсолютно поглощающим). Излучение абсолютно чёрного тела иногда называется "**чёрным излучением**", а само тело — "**полным излучателем**". Топочное устройство с "глазком" в плавильных или коксовых печах, муфельные печи с отверстием, зрачок глаза являются примерами (моделями) абсолютно чёрных тел.

Спектральные лучеиспускательная и поглощательная способности любого тела связаны между собой *законом Кирхгофа*: отношение спектральных лучеиспускательной способности к поглощательной способности для любых тел при данных температуре и длине волны одинаково и не зависит от природы этих тел.

Это отношение является спектральной лучеиспускательной способностью (спектральной энергетической светимостью) абсолютно черного тела при данных температуре и длине волны:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^0 .$$

Таким образом, закон Кирхгофа можно выразить равенством:

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_3 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_n = f(\lambda, T)$$

Допустим, что одно из этих тел абсолютно черное, обозначим его излучательную способность через $u_{\lambda,T}$. Учитывая, что коэффициент поглощения абсолютно чёрного тела равен единице, можем записать закон Кирхгофа так

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = \frac{u_{\lambda,T}}{1} = f(\lambda, T). \quad (8)$$

Следовательно, универсальная функция Кирхгофа есть излучательная способность абсолютно чёрного тела, то есть

$$f(\lambda, T) = u_{\lambda,T}, \quad (9)$$

Закон Кирхгофа можно записать в двух формах.

Отношение излучательной способности любого тела к его спектральному коэффициенту поглощения равно излучательной способности абсолютно чёрного тела для той же длины волны и при той же температуре

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = u_{\lambda,T} \quad (10)$$

(дифференциальная форма закона Кирхгофа)

Отношение светимости серых тел к их коэффициенту поглощения есть универсальная (общая для всех серых тел) функция температуры:

$$\frac{R}{\alpha_{\lambda,T}} = f(T) \quad (11)$$

(интегральная форма закона Кирхгофа)

где R относится ко всему спектру излучения при данной температуре.

Для абсолютно чёрного тела $\alpha = 1$ при всех температурах, поэтому R и есть его светимость при температуре T . Так как для всех тел $\alpha < 1$, то светимость серых (не чёрных) тел всегда меньше, чем у абсолютно чёрного тела. Основываясь на гипотезе о квантовой природе излучения, Планк методами статистической физики показал, что

$$u_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (12)$$

где $h = \hbar \cdot 2\pi$ – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; c – скорость света.

На основании формулы (3) интегральную интенсивность излучения абсолютно чёрного тела можно получить интегрированием функции Планка по всему интервалу длин волн

$$R = \int_0^{\infty} u_{\lambda,T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad (13)$$

или

$$R = \sigma T^4 . \quad (14)$$

Итак,

полная энергия, излучаемая абсолютно чёрным телом в 1с, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

(закон Стефана–Больцмана)

$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м²·с·К⁴) — *постоянная Стефана–Больцмана* была определена опытным путем. В единицах СИ она выражается в Дж/(м²·с·К⁴). Пользуясь известным значением, Макс Планк впервые определил свою постоянную h (*постоянная Планка*).

Из закона Стефана–Больцмана следует, что количество теплоты, передаваемое единицей поверхности абсолютно черного тела, находящегося при температуре T_1 , в окружающую среду, имеющую температуру T_2 , если среду можно рассматривать как абсолютно черное тело, равно

$$R = R_1 - R_2 = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) . \quad (15)$$

Излучение всех остальных тел подчиняется такой же закономерности, их излучение для каждой длины волны в a_T раз меньше, чем для абсолютно чёрного тела. Полное излучение

$$R = a_T \sigma T^4 , \quad (16)$$

где a_T — константа вещества (иначе называемая *коэффициентом серости*), которая показывает, *во сколько раз серое тело излучает энергии меньше, чем абсолютно чёрное, взятое при той же температуре*.

Из формулы Планка можно сделать вывод о распределении излучения по длинам волн. Максимум интенсивности излучения определяется из условия

$$\frac{du_{\lambda,T}}{d\lambda} = 0 ,$$

что приводит к выражению

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (17)$$

где b ($b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К).

Закон смещения Вина - длина волны, на которую приходится максимум интенсивности излучения, обратно пропорциональна температуре, то есть максимум излучения с увеличением температуры смещается в сторону коротких длин волн.

Характер зависимости (12) для разных температур показан графически на рис. 1.

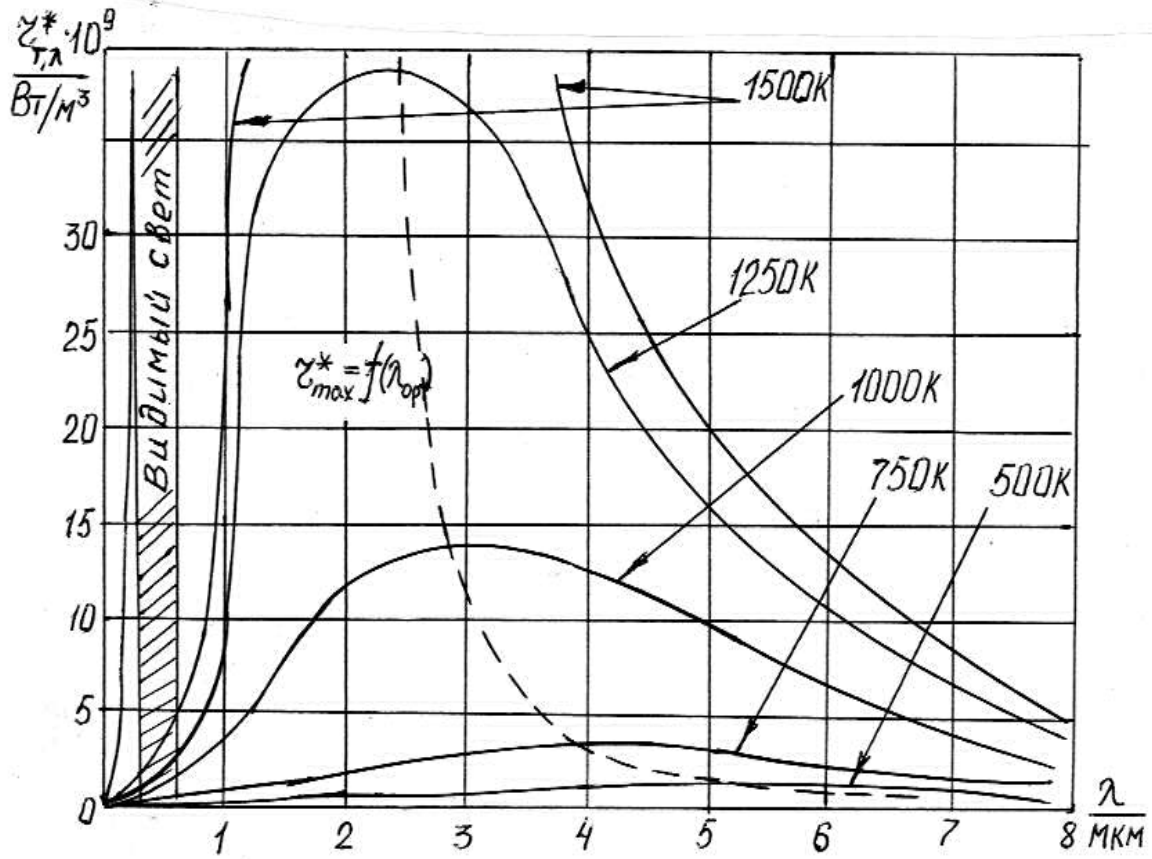


Рис. 1. Зависимость излучательной способности абсолютно черного тела $r_{\lambda,T} = u_{\lambda,T}$ от температуры.

Формула Планка согласуется с результатами исследований технических моделей абсолютно черного тела и экспериментально установленными законами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Лабораторная работа состоит из двух экспериментов. В первом и втором опыте в качестве излучающего тела используется нить накала вакуумной лампы и исследуется зависимость интегральной энергетической светимости от температуры. Для определения температуры нити накаливания снимается вольтамперная характеристика, по которой определяется величина статического сопротивления ($R = \frac{U_{нак}}{I_{нак}}$) нити и рассчитывается ее температура. Таким образом, в данном опыте температура катода определяется косвенным методом на основании зависимости сопротивления проводника от температуры:

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

$$T = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} \quad (18)$$

$$R = \frac{U_{нак}}{I_{нак}}$$

где α - температурный коэффициент сопротивления материала, из которого изготовлен катод, в нашем случае лампа имеет оксидный вольфрамовый накальный катод и можно принять $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

В самом начале работы нужно рассчитать R_0 – условное сопротивление нити при абсолютном нуле $T=0$:

$$R_0 = \frac{R_{комн.}}{1 + \alpha T}$$

Сопротивление при комнатной температуре $T \approx 300 \text{ K}$ считать равным $R_{ком} \approx 1,528 \text{ Ом}$, сопротивление же разогретого катода определяется по закону Ома путем измерения $U_{кат}$, $I_{кат}$ встроенным «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРОМ».

На рисунке 2 представлена типичная вольтамперная характеристика нити накаливания. Видно, что при малых значениях тока ток линей-

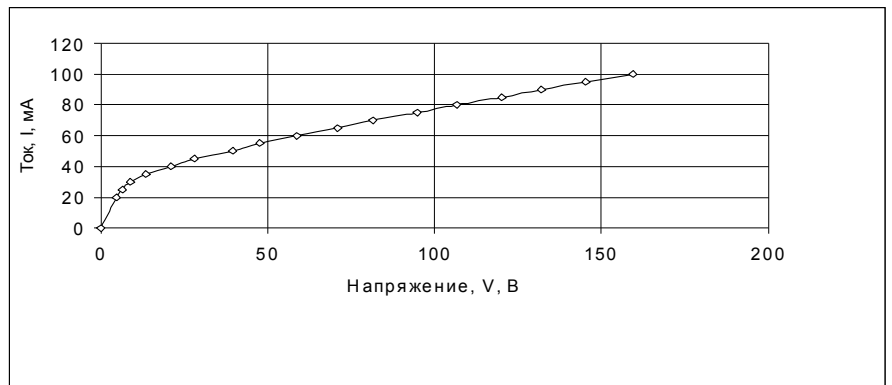


Рис.2 Типичный вид вольтамперной характеристики нити накаливания.

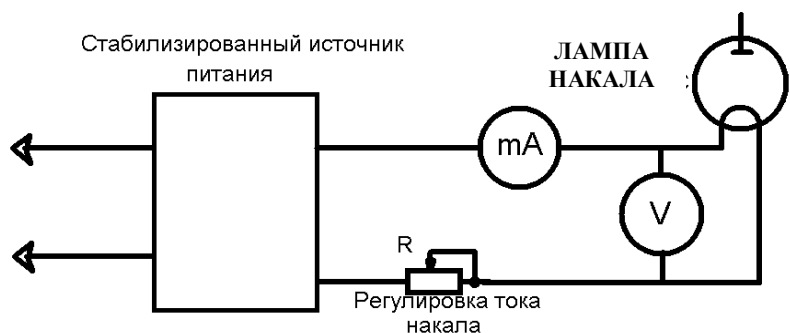


Рис.3 Принципиальная блок-схема первого эксперимента установки ФКЛ-15.

но зависит от приложенного напряжения и соответствующая прямая проходит через начало координат. При дальнейшем увеличении тока нить накала разогревается, сопротивление лампы увеличивается и наблюдается отклонение вольтамперной характеристики от линейной зависимости, проходящей через начало координат. Для поддержания тока при большем сопротивлении требуется большее напряжение. Дифференциальное сопротивление лампы $R_{\partial} = dU/dI$ монотонно уменьшается и вольтамперная характеристика в целом носит нелинейный характер.

Принципиальная электрическая блок схема первого эксперимента для учебной установки ФКЛ-15 приведена на рис. 3. Напряжение от источника питания поступает на исследуемую нить накала лампы накаливания. Регулировка тока накала обеспечивается кнопками «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» (на блок схеме показаны как резистор R). Ток накала и напряжение накала измеряется комбинированным цифровым «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРОМ», показания индусируются на ЖКД LCD индикаторе. Так как исследуемый образец оксидного катода подчиняется закону Стефана-Больцмана в ограниченном диапазоне температур, измерения проводятся в интервале 1000-2200 К.

Все элементы схемы питаются от стабилизированного источника питания. Выбор эксперимента осуществляется с помощью многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВЫБОР/EXIT». Запуск выбранного эксперимента осуществляется нажатием многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВХОД/ТЕМПЕРАТУРА».

Температура вольфрамового катода, как правило, неодинакова в различных точках, т. к. его концы охлаждаются значительно сильнее, чем середина за счет теплоотвода на массивных держателях. При симметрично расположенных держателях, можно считать, что кривая изменения температуры вдоль катода имеет широкий размытый максимум в средней части, что позволяет считать, что большая часть нити накала имеет во всех точках практически одинаковую температуру.

Считая, что вся потребляемая электрической лампой мощность $P = I_{\text{нак}} U_{\text{нак}}$ отводится излучением, можно определить интегральную излучающую способность как:

$$R_{\text{изл.}} = \frac{U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}}{S}$$

а затем из формул (15) (16), пренебрегая температурой окружающей среды T_2 по сравнению с температурой разогретой нити накала, определить постоянную Стефана-Больцмана как:

$$\sigma = \frac{U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}}{S a_T T^4} \quad (19)$$

где площадь излучающей поверхности нити накала лампы принять равной $S=3,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, температуру для каждого значения тока и напряжения на-

кала рассчитывать по формуле (18). Степень черноты (интегральный коэффициент излучения) a_T оксидного катода зависит от температуры, а также от природы излучателя и состояния поверхности. Значения a_T для исследуемого в данной работе излучателя взять из таблицы 1.

Интегральный коэффициент излучения a_T оксидного вольфрамового катода. Таблица 1.

Истинная температура, T, К	a_T
1000	0.118
1200	0.201
1400	0.218
1600	0.315
1800	0.348
2000	0.423
2200	0.516

Значения a_T в промежуточных точках находят, построив график зависимости $a_T(T)$ и интерполируя значения двух известных соседних точек к искомой.

Во втором эксперименте в качестве объекта исследования также используется нить накала обычной лампы накаливания, представляющая собой хорошую модель излучателя – серого тела. Температура нити накаливания лампы устанавливается многофункциональной кнопкой «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВХОД/ТЕМПЕРАТУРА». В качестве ИК-спектрометра в данном эксперименте используется его электрическая модель. Излучение от лампы накаливания попадает на фотодатчик. Считая, что максимум спектральной чувствительности фотодатчика изменяется в зависимости от приложенного напряжения и находится при данном поданном напряжении смещения на датчик в достаточно узкой области длины волны (спектральная характеристика фотоприемника имеет ярко выраженный максимум при определенной длине волны при подачи на него данного напряжения смещения), можно использовать его как модель ИК-спектрометра.

Установка максимальной спектральной чувствительности датчика осуществляется кнопками «ДЛИНА ВОЛНЫ», установленное значение длины волны отображается на ЖКД LCD дисплее. Таким образом, измеряется значение излучательной способности серого тела на данной длине волны при некоторой установленной температуре нити накала излучателя. Напряжение фотодатчика $u_{вых}$ пропорционально величине излучательной способности $r_{\lambda, T}$ нити накала, так при освещении фотодатчика в цепи его возникает электрический ток, пропорциональный падающему световому потоку. Такая система, применяемая во втором эксперименте, позволяет снять зависимости излучательной способности серого тела $r_{\lambda, T} = u_{\lambda, T} \sim u_{вых}$ от длины волны при различных температурах и получить семейство характеристик, представленных на рис. 1.

Порядок выполнения

1. Перед выполнением работы проверить целостность сетевого провода, а также соединительных проводов.
2. Включить установку в сеть ~220 В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на «БЛОКЕ УПРАВЛЕНИЯ» в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод.
3. С помощью многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВЫБОР/EXIT» выбрать первый эксперимент MODE1 для исследования зависимости интегральной энергетической светимости нагретого серого тела от температуры.
4. Запустить эксперимент на выполнение нажатием многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВХОД/ТЕМПЕРАТУРА».
5. Многофункциональными кнопками «УСТАНОВКА ТОКА/ДЛИНА ВОЛНЫ» изменять ток накала лампы, контролировать значение этого тока $I_{\text{нак}}$ и падения напряжения на накале $U_{\text{нак}}$, с помощью встроенного комбинированного «ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА». Данные занести в таблицу 2.
6. Для каждого измеренного значения тока и напряжения накала, рассчитать мощность, рассеиваемую излучателем, интегральную излучающую способность, сопротивление нити накала и температуру нити; затем по формуле (19) значение постоянной Стефана-Больцмана σ . Определить среднее значение $\langle \sigma \rangle$. Сравните полученный результат со справочным значением и оцените погрешность. **ВСЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЬ В СИ.** Все данные занести в табл. 2.

Табл. 2

$U_{\text{нак}}, \text{В}$	$I_{\text{нак}}, \text{А}$	$P = U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}, \text{Вт}$	$R_{\text{изл}} = \frac{U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}}{S}, \text{Вт/м}^2$	$R = \frac{U_{\text{нак}}}{I_{\text{нак}}}, \text{Ом}$	$T = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha}, \text{К}$	$\sigma = \frac{U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}}{S a_T T^4}, \text{Дж/(м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)$
...
...

$$\langle \sigma \rangle = \dots$$

7. Остановить эксперимент, нажав кнопку «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВЫБОР/EXIT» и выбрать той же кнопкой второй эксперимент MODE2 для исследования зависимости излучательной способности нагретого тела от длины волны при фиксированной температуре излучателя.
8. Запустить эксперимент на выполнение нажатием многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВХОД/ТЕМПЕРАТУРА».
9. При данном установленном значении температуры нити накала, отображаемом на ЖКД дисплее, снять зависимость излучательной способности серого тела $\epsilon_{\lambda, T}$, которое пропорционально напряже-

нию с выхода фотодатчика $r_{\lambda, T} \sim u_{\text{ВЫХ}}$, от длины волны λ : $r_{\lambda, T} = r_{\lambda, T}(\lambda) \sim u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}}(\lambda)$. Сканирование по длине волны осуществлять многофункциональными кнопками «УСТАНОВКА ТОКА/ДЛИНА ВОЛНЫ».

10. Построить график зависимости $u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}}(\lambda)$ при данной температуре. График должен иметь вид, совпадающий с рис. 1.
11. По построенному экспериментальному графику определить значение длины волны λ_{max} , при котором излучательная способность достигает максимального значения.
12. По формуле (17) рассчитать значение постоянной Вина b . Установленное значение температуры нити накала T отображается на измерительном приборе.
13. Устанавливая с помощью многофункциональной кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ. ВХОД/ТЕМПЕРАТУРА» другие значения температуры нити накаливания лампы, повторите действия пп. 9 – 12.
14. По результатам всех экспериментов рассчитайте среднее экспериментальное значение постоянной Вина $b_{\text{эксп}}$ и сравните полученный результат с табличным значением.
15. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое тело называется абсолютно черным? Что такое энергетическая светимость?
2. Дайте определение спектральной плотности энергетической светимости. Каким соотношением она связана с энергетической светимостью тела? Что называется коэффициентами поглощения, отражения и пропускания? Как зависит излучательная способность тела от температуры и длины волны?
3. Напишите формулу Планка и получите выражение для постоянной Стефана-Больцмана.
4. В чем заключается закон смещения Вина?
5. Что выражает закон Стефана-Больцмана? Напишите его формулу. Каков физический смысл и размерность постоянных Стефана-Больцмана и Вина.
6. В чем состоит закон Кирхгофа? Как он используется в настоящей работе?
7. Объясните принцип работы экспериментальной установки согласно блок-схеме рис. 3. Каким образом вы определяли температуру разогретой нити накала?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М., Высшая школа, 1989.
2. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под редакцией Шейндлина А.Я. М., Энергия. 1974.
3. Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М., Наука, 1968.
4. Шапочкин М.Б. Статистическая физика. М., Издательский дом Московского Физического общества, 2004.
5. Савельев И.В. Курс общей физики.- М.:Наука,1979.-Т.3
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1972.- Т.3.
- 7.Теплообмен излучением: Справочник/А.Г.Блох, Ю.А.Журавлев, Н.Л.Рыжков- М. :Энергоиздат, 1991.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ,
НПО «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**