

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Кафедра физики

А.С. Климов, А.В. Медовник

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Руководство к лабораторной работе по физике для студентов всех
специальностей

Томск
2023

УДК 531.1
ББК 22.3

Рецензент:
Немирович-Данченко Л.Ю., старший преподаватель кафедры
физики ТУСУР

Климов, Александр Сергеевич

К492 Тепловое излучение: руководство к лабораторной работе по физике для студентов всех специальностей / А. С. Климов, А.В. Медовник – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 17 с.

В работе представлена краткая теория теплового излучения, описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты знакомятся с понятием абсолютно черного тела, определяют энергетическую светимость и находят коэффициент поглощения излучения.

Методические указания предназначены для использования студентами всех специальностей при подготовке, выполнении и защите лабораторной работы по физике.

Одобрено на заседании каф. физики протокол №104 от 16.04.23

УДК 531.1
ББК 22.3

© Климов А.С., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА	10
3 ЗАДАНИЕ	14
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	14
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	17

ВВЕДЕНИЕ

Тепловым излучением тел называется электромагнитное излучение, возникающее за счет той части внутренней энергии тела, которая связана с тепловым движением его частиц

Целью данной работы является изучение основных характеристик и законов теплового излучения на основе измерения зависимости энергетической светимости нагретого тела от температуры.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Тепловой характер возбуждения частиц вещества выделяет тепловое излучение из всех других типов свечения. Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счёт любого другого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием «люминесценция».

*Тепловое излучение отличается от других типов излучения еще тем, что это **единственный** тип излучения, который может находиться в равновесии с излучающими телами.*

Равновесное тепловое излучение устанавливается в адиабатически изолированной системе при термодинамическом равновесии, когда все тела системы имеют одинаковую температуру. В этом случае *энергия теплового излучения, испускаемого каждым телом, компенсируется энергией излучения, поглощаемого этим телом.*

Основные характеристики теплового излучения

1) Поток энергии излучения – это энергия, излучаемая телом за единицу времени

$$\Phi = \frac{dE_{\text{изл}}}{dt}, \quad (1.1)$$

где $dE_{\text{изл}}$ - энергия, излучаемая телом за время dt .

2) Энергетическая светимость излучающего тела

$$R(T) = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (1.2)$$

Величина $R(T)$, являясь функцией термодинамической температуры T , численно равна энергии, излучаемой телом по всем направлениям в единицу времени с единицы площади во всем спектральном диапазоне, и, таким образом, представляет собой интегральную характеристику излучающего тела. Светимость имеет смысл плотности потока энергии и измеряется в Дж/(м²·с) или Вт/м².

3) Спектральная плотность энергетической светимости или

излучательная (испускаемая) способность тела вводится для более детального описания распределения излучаемой энергии по длинам волн (частотам). Измерения показывают, что энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускают нагретые тела. Спектральная плотность энергетической светимости – это физическая величина $r_{\lambda,T}$ (или $r_{\nu,T}$), численно равная энергии $dE_{изл}$, излучаемой во всех направлениях за единицу времени с единицы площади поверхности излучающего тела в единичном интервале длин волн (или частот) от λ до $\lambda+d\lambda$ (или от ν до $\nu+d\nu$):

$$r_{\lambda,T} = \frac{dE_{изл}}{S \cdot t \cdot d\lambda}, \quad (1.3)$$

$$r_{\nu,T} = \frac{dE_{изл}}{S \cdot t \cdot d\nu}, \quad (1.4)$$

Из определения вытекает связь между энергетической светимостью и излучательной способностью

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu, \quad (1.5)$$

где интегрирование по длинам волн (частоте) распространяется на весь спектральный диапазон. Из (1.5) следует связь между излучательными способностями $r_{\lambda,T}$ и $r_{\nu,T}$, выраженными через λ и ν , соответственно:

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}. \quad (1.6)$$

4) Поглощательная способность или коэффициент монохроматического поглощения – это физическая величина, равная отношению энергии, поглощенной поверхностью тела, к величине энергии падающего излучения

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{E_{погл}(\lambda, T)}{E_{пад}(\lambda, T)} \quad (1.7)$$

Коэффициент монохроматического поглощения является *безразмерной величиной*, зависящей от длины волны и температуры. Величина $\alpha(\lambda, T)$ может принимать значения от 0 до 1.

Поведение коэффициента поглощения $\alpha(\lambda, T)$ реальных тел (рис. 1.1) может иметь очень сложный характер (см. нижнюю кривую на рис. 1.1). Однако, могут иметь место случаи, когда коэффициент поглощения будет близок к некоторой константе во всём спектральном диапазоне ($\alpha = \text{const}$). Абсолютно чёрное тело обладает максимальным коэффициентом поглощения $\alpha = 1$. Следовательно, по определению (1.7) абсолютно чёрное тело полностью поглощает падающее на него излучение всех длин волн при любой температуре. Тело называется серым, если его коэффициент поглощения одинаков для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности $\alpha(T) = \text{const} < 1$. Для серых тел коэффициент поглощения принято называть коэффициентом серости (черноты). Для остальных тел $\alpha(\lambda, T) < 1$ зависит от длины волны и температуры. При изменении температуры характер зависимости коэффициента поглощения от длины волны может изменяться, лучи, сильно поглощающиеся при одной температуре, могут не поглощаться при другой.

На рисунке 1.1 изображена зависимость коэффициента поглощения от длины волны для трёх типов тел.

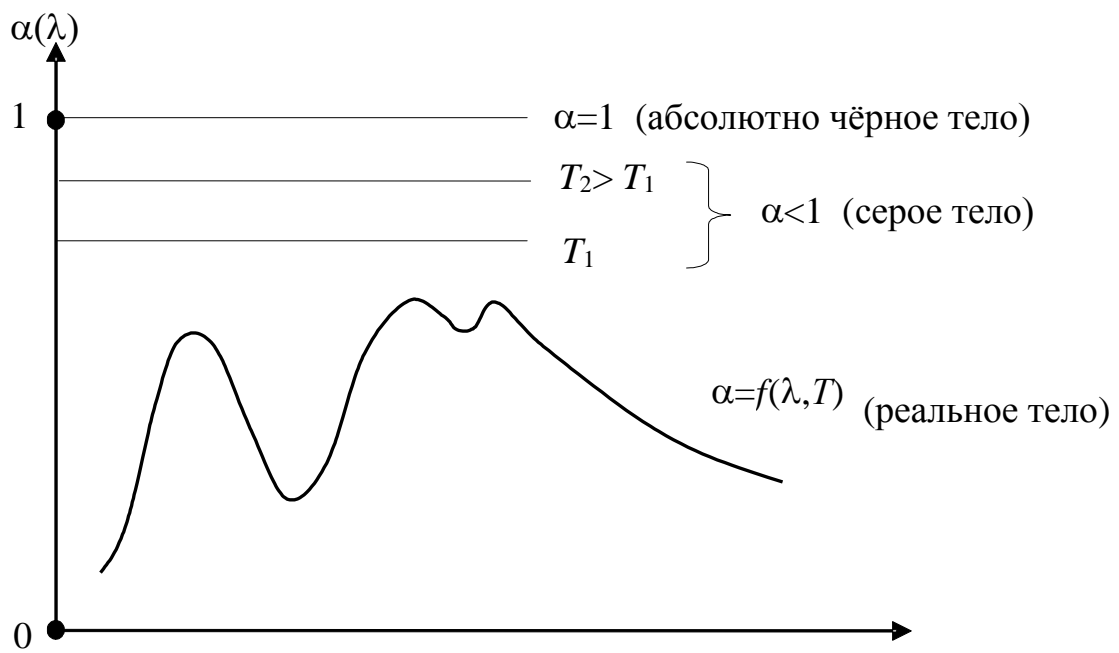


Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента поглощения от длины волны при постоянной температуре $T = \text{const}$

Законы теплового излучения

1. Закон Кирхгофа устанавливает связь между излучательной и поглощательной способностями различных тел, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. Закон Кирхгофа утверждает, что для всех тел, независимо от их природы, отношение излучательной способности к поглощательной способности, при одинаковой температуре и для одинаковых длин волн, есть величина постоянная, равная универсальной функции Кирхгофа $f(\lambda, T)$.

Закон Кирхгофа можно выразить равенством:

$$\left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}} \right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}} \right)_n = f(\lambda, T), \quad (1.8)$$

где индексы 1, 2, ..., n – номер тела.

Допустим, что одно из этих тел черное, обозначим его излучательную способность $r_{\lambda, T}^0$, а поглощательную $\alpha_{\lambda, T}^0$. Т.к. коэффициент поглощения абсолютно чёрного тела $\alpha_{\lambda, T}^0 = 1$, то универсальная функция Кирхгофа есть излучательная способность чёрного тела

$$f(\lambda, T) = r_{\lambda, T}^0. \quad (1.9)$$

2. Формула Планка.

Выражение для излучательной способности абсолютно черного тела было получено немецким физиком Планком. Согласно квантовой гипотезе Планка *испускание энергии электромагнитных волн атомами вещества может происходить только отдельными "порциями" - квантами*. При этом энергия кванта:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \quad (1.10)$$

где h – константа, названная постоянной Планка, c – скорость света в вакууме, ν – частота излучения, λ – длина волны излучения.

На основании этой гипотезы Планк получил выражение, позволяющее определить спектральную плотность энергетической светимости для абсолютно чёрного тела:

$$r_{\nu, T}^0 = f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]}, \quad (1.11)$$

$$r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda,T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}, \quad (1.12)$$

где k – постоянная Больцмана.

Формула Планка (1.12) хорошо согласуется с экспериментальными данными во всем интервале наблюдаемых длин волн и температур. Графики зависимости спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела от длины волны для различных температур приведены на рисунке 1.2.

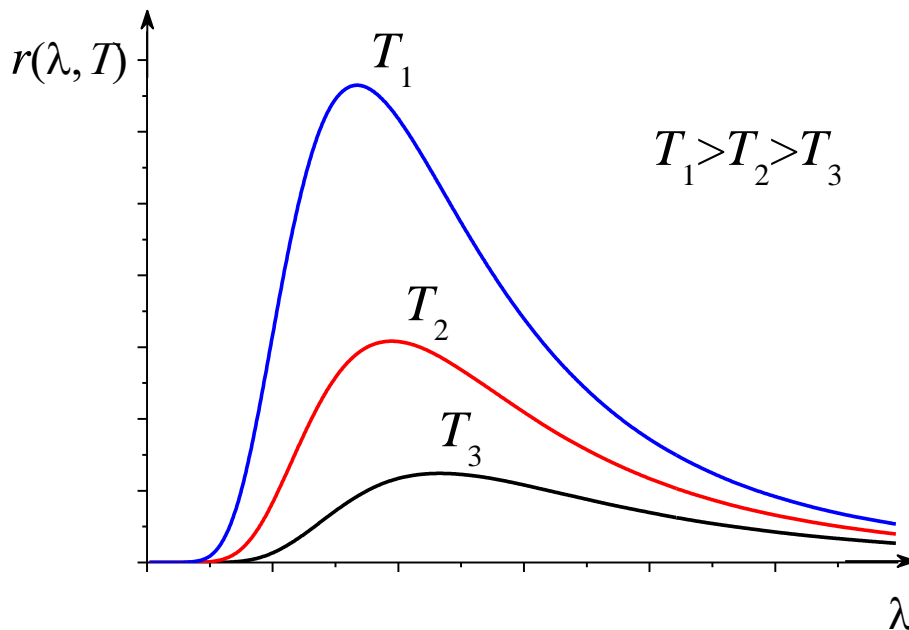


Рисунок 1.2 – Зависимость спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела от длины волны при различных температурах

Основные законы теплового излучения можно получить из формулы Планка (1.12). Однако многие из них были получены до открытия Планком своей формулы, на основе экспериментальных данных и представлений классической физики. Эти законы носят имя учёных, открывших их.

3. Закон смещения Вина.

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

$$\frac{df(\lambda, T)}{d\lambda} = 0, \text{ или } \frac{dr_{\lambda, T}^0}{d\lambda} = 0.$$

Это приводит к выражению

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (1.13)$$

где $b=2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина.

Закономерность (1.13) была установлена раньше Вином на основе экспериментальных данных и поэтому носит название закона Вина.

Согласно закону Вина, *длина волны (λ_{\max}) на которую приходится максимум излучательной способности, обратно пропорциональна термодинамической температуре T . Т.е. максимум излучения с увеличением температуры смещается в сторону коротких длин волн.*

4. Закон Стефана-Больцмана.

В 1879 г. Стефан из анализа экспериментальных данных, а в 1884г. Больцман из термодинамических представлений, получили зависимость энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры:

$$R(T) = \sigma T^4, \quad (1.14)$$

где $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана утверждает, что: *энергетическая светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его термодинамической температуры.*

Формулу (1.14) можно получить, используя формулу Планка (1.12). Для этого необходимо в формулу (1.5) подставить выражение (1.12) и провести интегрирование по всем длинам волн (от нуля до бесконечности):

$$R(T) = 2\pi c^2 h \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (1.15)$$

В результате получим:

$$R(T) = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15 h^3 c^2}. \quad (1.16)$$

Из выражения (1.16) следует, что постоянная Стефана-Больцмана равна:

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

и полностью совпадает с полученной экспериментально.

Хотя закон Стефана-Больцмана имеет силу лишь для абсолютно черного тела, в определенном интервале температур допустимо его использование в качестве приближения и для серых тел в виде:

$$R^c(T) = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (1.17)$$

где безразмерная (и не зависящая от температуры) константа $\alpha < 1$ называется степенью черноты тела или коэффициентом серости. Физический смысл этого параметра очевиден: величина $1/\alpha$, обратная коэффициенту серости, показывает, во сколько раз энергетическая светимость абсолютно черного тела $R^0(T)$ превышает аналогичную характеристику $R^c(T)$ для серого тела при той же температуре.

Для всех других тел (а с ними обычно и приходится иметь дело на практике) закон Стефана-Больцмана неприменим. Если попытаться придать ему более общую форму

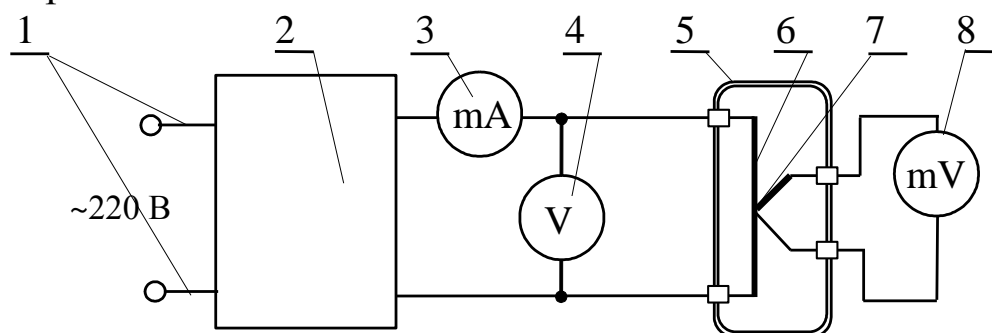
$$R(T) = \alpha \cdot \sigma \cdot T^z, \quad (1.18)$$

то оказывается, что коэффициент серости α и показатель степени z являются характеристиками конкретного тела и зависят от его температуры. Однако в настоящей работе мы будем полагать, что рассматриваемые характеристики постоянны в пределах используемого интервала температур. Таким образом, измерив в эксперименте величины α и z можно сделать вывод о том, на сколько сильно исследуемое тело отличается от абсолютно черного тела по температурному поведению энергетической светимости $R(T)$.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводятся на установке, схема которой изображена на рисунке 2.1. Излучающим телом является платиновая нить 6 длиной $l = 7$ см и диаметром $d = 0.2$ мм, заключенная в стеклянный откачанный баллон 5. Нагрев нити осуществляется электрическим током от блока питания 2. Вольтметр 4 и миллиамперметр 3 показывают падение напряжения и ток в цепи накала нити, соответственно. В непосредственном контакте с нитью находится хромель-копелевая термопара 7. В ее цепь включен милливольтметр 8, который позволяет из-

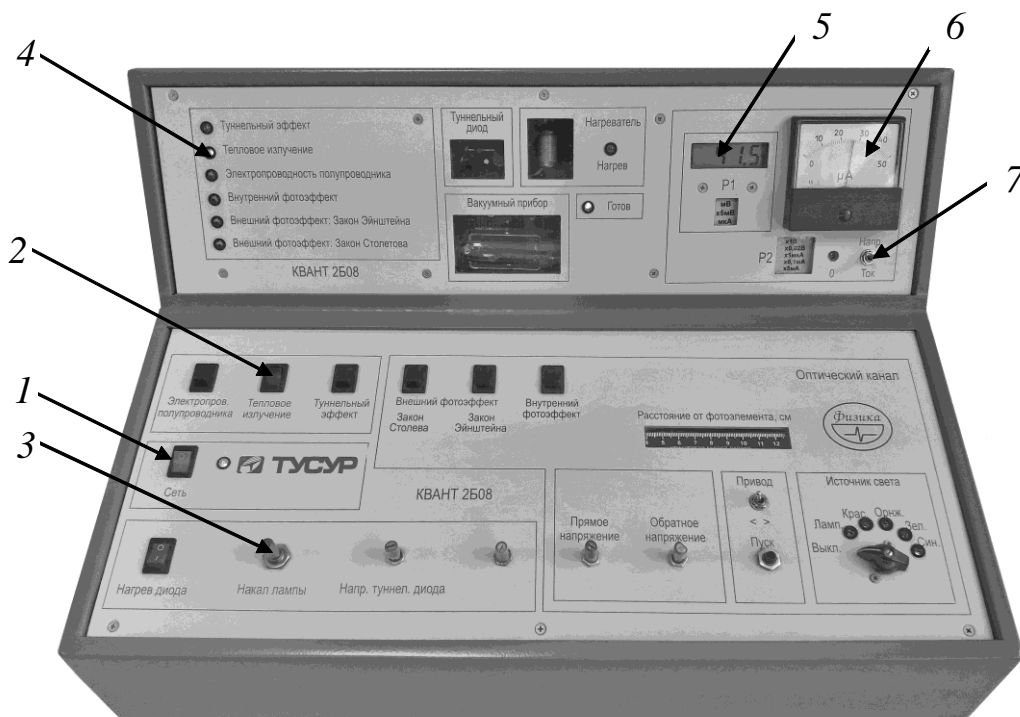
мерять величину термо-ЭДС (ТЭДС), возникающую при нагреве спая термопары.



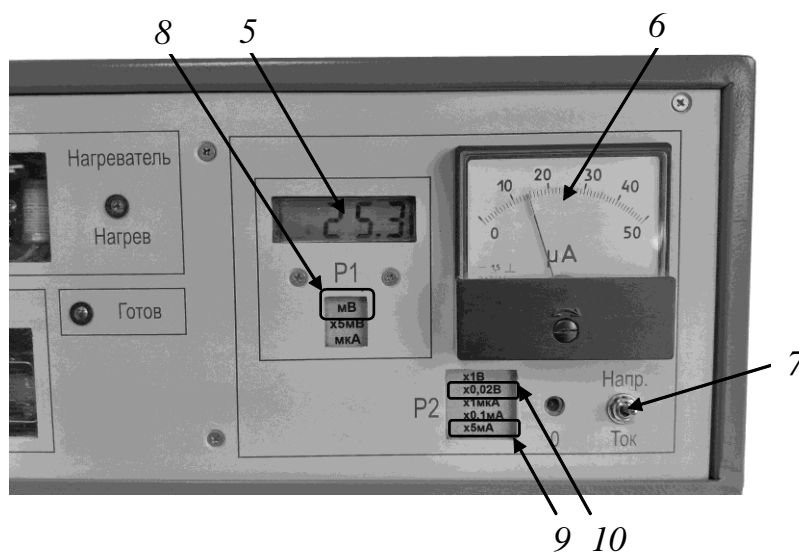
1 – сеть; 2 – блок питания; 3 – миллиамперметр тока накала нити; 4 – вольтметр напряжения накала; 5 – вакуумированный стеклянный баллон; 6 – исследуемое тело – платиновая нить; 7 – хромель-копелевая термопара; 8 – милливольтметр для измерения термо-э.д.с.

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки.

Конструктивно установка оформлена в виде настольного блока, внешний вид которого приведен на рисунке 2.2. На горизонтальной панели установки расположены органы управления, а на наклонной панели – контрольно-измерительные приборы. В настоящей работе используются кнопки: 1 «Сеть», 2 «Тепловое излучение» и рукоятка 3 «Накал лампы». При нажатии кнопки 2 загорается соответствующий индикатор 4 – «Тепловое излучение». **Термо-э.д.с.** считывается с цифрового прибора 5 **в милливольтгах** (рис. 2.3), а ток и напряжение накала нити измеряются стрелочным прибором 6 при соответствующем положении переключателя 7 (Напр. - Ток). При этом используются множители: **для тока ×5 мА, для напряжения ×0,02 В**, рис. 2.3.



1 – кнопка «Сеть», 2 – кнопка выбора работы «Тепловое излучение», 3 – регулировка накала лампы, 4 – индикация выбранной работы, 5 – цифровой прибор для считывания значения **Термо-э.д.с.**, 6 – стрелочный прибор для определения напряжения и тока накала, 7 – переключатель «напряжение-ток».



5 – Значения Термо-э.д.с. с цифрового прибора, 6 – стрелочный прибор для определения напряжения и тока накала, 7 – переключатель «напряжение-ток», 8 – единицы измерения цифрового прибора, 9 – множитель при измерении тока, 10 – множитель при измерении напряжения накала

Рисунок 2.3 – Расположение измерительных приборов на наклонной панели установки

В рамках настоящей лабораторной работы необходимо экспериментальным путем получить зависимость энергетической светимости R от температуры T . Измерение температуры в тех пределах, которые актуальны для данной работы, не представляет собой сколько-нибудь значительной трудности. Однако прямое измерение энергетической светимости (1.2) как отношения потока лучистой энергии к площади излучаемой поверхности является весьма нетривиальной технической задачей. Поэтому основная идея настоящей работы состоит в том, чтобы измерять не поток излучения Φ (излучаемую мощность), а, что гораздо проще, мощность P , подводимую к нагретому телу для поддержания его при постоянной температуре (потребляемую мощность). Таким образом, мы полагаем, что вся подводимая к излучателю энергия целиком преобразуется в энергию теплового излучения, т.е. $P = \Phi$. Однако следует подчеркнуть, что это равенство носит всего лишь приближенный характер. Действительно, часть подведенной энергии передается в виде тепла от излучателя в окружающую среду. Влияние одного из механизмов передачи тепла - конвекции - существенно ослаблено тем, что излучаемый элемент помещен в откачанный стеклянный баллон. Второй канал рассеяния энергии – теплопроводность - обуславливает потери тепла в местах контакта излучателя с другими элементами установки. Относительная роль этого механизма теплопередачи снижается при росте температуры излучателя, что приводит к улучшению качества получаемых результатов. В связи с чем, измерения рекомендуется проводить при высоких значениях тока и напряжения накала.

Измерение потока излучения Φ платиновой нити заменяется измерением подводимой к ней электрической мощности $P = I \cdot U$, где I – сила тока, а U – падение напряжения в цепи накала нити. Площадь излучающей цилиндрической поверхности нити $S = \pi dl$, где d – диаметр, а l – длина платиновой нити. Таким образом, в соответствии с выражением (1.2), величина энергетической светимости нагретого тела в данной работе рассчитывается по формуле

$$R = \frac{IU}{S}. \quad (2.1)$$

Чтобы определить температуру платиновой нити, необходимо располагать градуировочным графиком термопары. В хорошем приближении можно считать, что зависимость Термо-э.д.с. ($E_{ТЭДС}$) термопары от ее абсолютной температуры T носит линейный характер:

$$E_{TЭДС} = k \cdot (T - T_0), \quad (2.2)$$

где T_0 – абсолютная температура окружающей среды (определяется по градуснику в аудитории, где проводится работа), $k=0.1$ мВ/К – чувствительность термопары.

С помощью формулы (2.2) в настоящей работе рассчитывается абсолютная температура нити T по измеренным значениям Термо-э.д.с. термопары.

После того, как экспериментальным путем будет получена зависимость энергетической светимости R от абсолютной температуры T , необходимо определить коэффициент серости α платиновой нити и показатель степени z при температуре. С этой целью прологарифмируем обе части выражения (1.17):

$$\ln R = z \cdot \ln T + \ln(\alpha \cdot \sigma). \quad (2.3)$$

Отсюда видно, что если построить линеаризованный график в координатных осях $x = \ln T$ и $y = \ln R$, то показатель степени z будет представлять собой угловой коэффициент прямой, а $\ln(\alpha \cdot \sigma)$ – свободный член линейной функции.

3 ЗАДАНИЕ

3.1. Получить экспериментальную зависимость энергетической светимости платиновой нити от ее температуры.

3.2. Определить значение показателя степени при температуре и величину коэффициента серости платиновой нити.

3.3. Оценить погрешности измерений.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Перед началом работы все регулировки на установке вывести в крайнее положение против часовой стрелки. Все выключатели в положение «Выключено». Включить установку кнопкой «Сеть» 1 (рис. 2.2) и кнопкой 2 выбрать работу «Тепловое излучение». При этом убедиться в зажигании соответствующего индикатора 4. **Подождать 5 минут для прогрева установки.**

4.2 Выставить максимальные значения напряжения и тока накала.

4.3. Выждать 1 – 2 мин для установления значения термо-э.д.с., после чего записать значения тока накала I , напряжения U и Термо-

эд.с. $E_{\text{ТЭДС}}$ в таблицу 4.1, измеряя их по приборам 1 и 3 с использованием переключателя 4, рис. 2.3.

4.4 Рассчитать по формуле 2.1 энергетическую светимость R и ее логарифм и занести в таблицу 4.1.

4.5. Последовательно уменьшая напряжение накала рукояткой 3 (рис. 2.2), повторить измерения п.4.3 не менее 10 раз.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента.

№ изм.	U , В	I , мА	$E_{\text{ТЭДС}}$, мВ	R , Вт/м ²	$\ln(R)$	T , К	$\ln(T)$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

4.5. По данным таблицы построить график зависимости энергетической светимости нити от ее абсолютной температуры.

4.6. Нанести экспериментальные точки на график в координатах $\ln R$, $\ln T$. Используя метод наименьших квадратов, определить коэффициенты в уравнении прямой (2.3), а также погрешности коэффициентов и провести прямую на графике зависимости $\ln R$ от $\ln T$.

4.7. Определить величины z и α .

4.8. Рассчитать погрешности измерений коэффициента серости α и показателя степени z . Сделать выводы по результатам проделанной работы.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Какое излучение называют тепловым?

5.2. Почему тепловое излучение называют равновесным?

5.3. Что называется спектральной плотностью энергетической светимости?

5.4. Что такое поглощательная способность тела?

5.5. Зависят ли поглощательная способность и испускательная способности тела от температуры?

5.6. Какие тела можно назвать абсолютно черными?

5.7. Как связаны испускательная и поглощательная способности абсолютно черного тела и реальных тел.

5.8. Что называют энергетической светимостью тела?

5.9. Как зависит энергетическая светимость от испускательной способности тела?

5.10. Как записывается закон Стефана-Больцмана для нечерных тел?

5.11. Сформулируйте закон смещения Вина. Изобразите зависимость излучательной способности тела от длины волны для различных температур.

5.12. Запишите формулу Планка для испускательной способности абсолютно черного тела.

5.13. Сформулируйте закон Кирхгофа.

5.14. Почему зрачок глаза черный?

5.15. Какую информацию несет тепловое излучение находящееся в равновесии с телами, помещенными внутри печи о их свойствах и форме?

5.16. Можно ли полость с зеркальными стенками и узким отверстием считать моделью абсолютно черного тела? Почему?

5.17. Какие из перечисленных видов излучения можно отнести к тепловому излучению:

1) флуоресценцию; 2) излучение Солнца; 3) лазерное излучение; 4) излучение лампы накаливания. Почему?

6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

6.1. Савельев, И. В. Курс физики : учебное пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. — Том 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2019. — 308 с.

6.2. Мухачев, В. А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В. А. Мухачев. — Томск: ТУСУР, 2012. — 24 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>. (дата обращения: 10.04.23)

6.3 Зенин, А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А. А. Зенин. — Томск: ТУСУР, 2019. — 20 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957>. (дата обращения: 10.04.23)