Министерство науки и
высшего образования
Российской Федерации

А.В. Демин, О.В. Денисова, С.Ф. Конев

Определение постоянной Стефана-Больцмана

Электронный текстовый ресурс

Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Атомная физика» для студентов всех форм обучения. Направления: 23.03.01 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах», 14.03.03 «Физика кинетических явлений», 14.03.05 «Ядерные и энергетические установки», 22.01.00 «Системный анализ и управление», 20.04.02 «Инженерное дело в медико-биологической практике», 14.03.07 «Радиационная безопасность человека и окружающей среды», 20.03.00 «Биомедицинская инженерия», 23.02.00 «Информационные системы», 14.03.06 «Электроника и автоматика физических установок», 01.06.00 «Прикладные математика и физика» 14.03.02 «Физика атомного ядра и частиц»

Позволяют провести экспериментальное изучение законов внешнего фотоэффекта и измерить постоянную Планка. Содержат теоретическую, экспериментальную части и вопросы для самоконтроля.

Подготовлено кафедрой «Теоретической физики и прикладной математики»

Екатеринбург
2019

Цель работы: экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана, определение одноименной константы, путем измерения температуры вольфрамовой нити пирометром спектрального отношения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ 3

Введение 3

Природа теплового излучения 4

Основные закономерности теплового излучения. Закон Кирхгофа 4

Закон Планка 7

Формула Вина и Релея-Джинса 8

Закон Стефана-Больцмана 9

Измерение температуры пирометром спектрального отношения 9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 11

Экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана 11

Описание лабораторной установки 13

Порядок выполнения лабораторной работы 14

Порядок проведения измерений 15

Обработка результатов измерений. 16

Приложение 1. Монохроматор МУМ 18

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 20

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 21

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Введение

В 1879 году австрийский физик Джозеф Стефан на основе опытов по излучению платиновой проволоки вывел эмпирический закон, что ее энергетическая светимость пропорциональна четвертой степени температуры. Позднее, в 1884 году, его ученик Людвиг Эдуард Больцман подтвердил теоретически эту формулу, используя в качестве модели излучающего тела, так называемое абсолютно черное тело (АЧТ). Для этого он, по выражению другого известного физика – Лоренца, смело применил к тепловому излучению термодинамические понятия – давление, температуру и энтропию.

Полученный экспериментально и подтвержденный теоретически закон, связывающий поток энергии излучения АЧТ ε(T) с его температурой *T*, был назван законом Стефана-Больцмнана:

$$\varepsilon(T) = \sigma \cdot T^4, \qquad (1)$$

а соответствующая константа $\sigma=5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) – постоянной Стефана-Больцмана.

В данной лабораторной работе предлагается проверить справедливость закона Стефана-Больцмана и рассчитать входящую в него константу σ. Для этого следует нагреть абсолютно черное тело до температуры *T*, измерить поток энергии $\varepsilon(T)$, исходящий от него, т.е. левую часть в выражении 1, и поделить его на температуру в четвертой степени. Задача на первый взгляд выглядит просто, но в реальности долгое время не удавалось получить данной закономерности именно потому, тепловое излучение реальных тел, не совпадает с излучением АЧТ.

В качестве замечания о практической важности закона Стефана-Больцмана стоит отметить интересный факт, что сам Стефан применил свой закон к излучению Солнца и определил температуру его поверхности – 5713 К (современное значение 5780 К). Полученное Стефаном значение температуры Солнца оставалось самым точным в течение всего XIX века.

Природа теплового излучения

При падении света на поверхность непрозрачного тела, одновременно происходят два процесса: отражение и поглощение. Световая энергия, поглощаемая телом, преобразуется в иные формы энергии, чаще всего в энергию теплового движения. Поэтому тела, поглощающие лучи, нагреваются.

Опытным путем было установлено, что любое нагретое тело излучает в пространство электромагнитные волны. Благодаря природе своего возникновения данный вид излучения назван тепловым. Причем, механизм этого излучения зависит от температуры тела и агрегатного состояния вещества.

При «низких» температурах (меньше 500 К) тепловое излучение обусловлено колебательно-вращательным движением частиц, составляющих тело: молекул, атомов или ионов. Спектр излучения при этом является сплошным и находится в инфракрасной невидимой области.

По мере нагревания тела кинетическая энергия движения частиц, его составляющих, увеличивается, энергия их излучения растет, и спектр смещается в видимую область. Таким образом, тепловое равновесное излучение осуществляется за счет энергии хаотического движения частиц тела.

В металлах существует дополнительный механизм излучения, связанный с наличием в них свободных электронов. Электроны движутся в кристаллической решетке, «сталкиваясь» с атомами. Средняя скорость их движения и частота соударений растет с увеличением температуры металла. В процессе торможения (движения с отрицательным ускорением), следуя классической электродинамике, происходит излучение электромагнитных волн.

Основные закономерности теплового излучения. Закон Кирхгофа

Густав Кирхгоф применил к равновесному излучению любого нагретого тела второе начало термодинамики и ввел понятия испускательной и поглощательной способности тела.

Согласно Кирхгофу, спектральная испускательная (излучательная) способность $e(\nu, T)$ ($e(\lambda, T)$). (иногда ее называют спектральной энергетической светимостью или спектральной поверхностной плотностью излучения) – это

энергия, излучаемая единицей поверхности тела за одну секунду в единичном интервале частот или длин волн.

Кроме испускательной способности тело можно охарактеризовать поглощательной способностью a (ν, T) (a (λ, T)). Поглощательная способность – это доля от падающей энергии, поглощенной единицей поверхности тела за одну секунду в единичном спектральном интервале при тепловом равновесии тела с излучением. Как следует из определения, поглощательная способность – безразмерная величина, меньшая или равная единице: $a(\nu, T) \leq 1$.

Закон Кирхгофа гласит, что отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности является универсальной функцией температуры тела T и частоты ν (длины волны λ) излучения, одинаковой для всех тел:

$$e(\nu,T)/a(\nu,T) = \varepsilon(\nu,T), \tag{2}$$

$$e(\lambda,T)/a(\lambda,T) = \varepsilon(\lambda,T), \tag{3}$$

где $\lambda = c/\nu$, c – скорость света в вакууме.

Для изучения и понимания законов теплового излучения реальных тел Густавом Кирхгофом в середине XIX века была введена физическая абстракция – абсолютно черное тело. Абсолютно черное тело (АЧТ) – это тело, которое поглощает все падающее на него излучение. Как следует из определения, его поглощательная способность равна единице для всех частот при любой температуре: $a_{\text{АЧТ}}(\nu, T) = 1$ (Рис. 1).

Хотя в природе АЧТ не существует, но для проведения экспериментов, калибровки теплоизмерительных приборов и т.д. достаточно хорошей моделью АЧТ может служить нагретая сферическая полость, с маленьким отверстием. Попадая в это отверстие, лучистый поток многократно отражается от стенок полости, и не имея возможности выйти наружу, поглощается таким образом почти целиком.

Используя определение абсолютно черного тела, очевидно, что универсальная функция Кирхгоффа $\varepsilon(\nu, T)$ ($\varepsilon(\lambda, T)$) – и есть испускательная способность АЧТ.

Любые тела, поглощательные способности которых меньше единицы ($a(\nu, T) < 1$), называются нечерными. При этом вид функции испускательной способности нечерного тела может отличаться от вида этой функции для АЧТ $\varepsilon(\nu, T)$. Это происходит потому, что поглощательная способность $a(\nu, T)$ зависит от частоты, т.е. на одних частотах энергия поглощается лучше, чем на других. Это свойство селективности поглощения нечерных тел имеет важное практическое значение.

Существуют, однако, такие тела, у которых поглощательная способность хотя и меньше единицы, но не зависит от длины волны (частоты). Такие тела называются серыми, для них выполняется соотношение:

$$a_{\text{сер}}(\nu, T) = const = a_{\text{сер}}(T) < 1. \qquad (4)$$

Примером серых тел в видимом диапазоне являются каменный уголь, сажа, платиновая и висмутовая черни.

Спектральные поглощательные способности АЧТ, серого тела и произвольного нечерного тела изображены на рисунке 1.

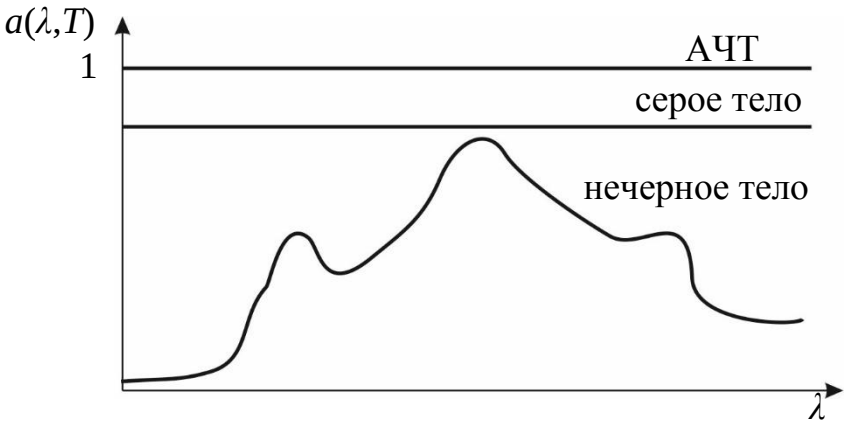

Рис. 1. Спектральная поглощательная способность АЧТ, серого и реального (нечерного) тела.

Установленные опытным путем закономерности равновесного излучения невозможно было точно описать, основываясь только на законах термодинамики и электродинамики. Лишь дополнительное предположение о корпускулярной природе электромагнитного излучения сделало возможным понять и объяснить механизм этого излучения. Первый шаг в этом направлении был сделан М. Планком в канун 1901 года.

Закон Планка

Экспериментально установлено, что тепловое излучение занимает очень широкую область в спектре электромагнитного излучения. Интенсивность этого излучения на разных частотах различная, при этом максимум интенсивности приходится на середину спектра. Точный вид распределения излучения АЧТ от частоты (длины волны) был теоретически получен М. Планком.

Согласно формуле Планка испускательная способность АЧТ в частотном представлении равна:

$$\varepsilon(\nu, T) = 2\pi h \frac{\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \tag{5}$$

где h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана.

Получим ε в представлении длин волн. Учтем, что испускательная способность тела является плотностью энергии, излучаемой им на данной частоте ν (длине волны $\lambda = c/\nu$). Интервалу частот $\mathrm{d}\nu$ соответствует интервал длин волн $\mathrm{d}\lambda$, принимая во внимание связь частоты с длиной волны ($\nu = c/\lambda$), можно записать $|\,\mathrm{d}\nu\,| \equiv c/\lambda^2\,\mathrm{d}\lambda$. Соответственно, можем записать элементарную энергию, излучаемую телом в спектральном интервале: $\varepsilon(\lambda,\mathrm{T})\cdot\mathrm{d}\lambda = \varepsilon(\nu,\mathrm{T})\cdot\mathrm{d}\nu$. Откуда получаем:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 2\pi h \frac{c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \tag{6}$$

Характерный вид испускательной способности $e(\nu, T)$ реального тела и АЧТ $\varepsilon(\nu, T)$ для заданной температуры представлен на рис. 2:

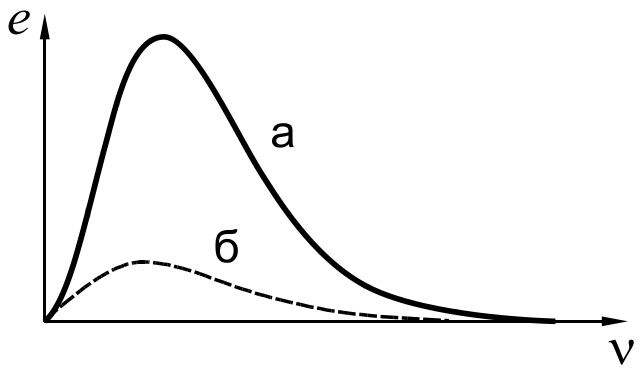

Рис. 2. Испускательная способность АЧТ (а) и реального тела (б)

при фиксированной температуре

Формула Вина и Релея-Джинса

Теоретически вывод формулы (6) был представлен Максом Планком 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал датой рождения квантовой физики. Однако незадолго до этого события в рамках классической физики были получены две другие теоретические формулы – формула Релея-Джинса и формула Вина. Обе они удовлетворительно описывают излучение АЧТ только в определенных областях спектра (рис. 3):

в длинноволновой $\left(\frac{hc}{\lambda kT} \ll 1\right)$ – формула Релея Джинса:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 2\pi \frac{ckT}{\lambda^4} \tag{7}$$

в коротковолновой $\left(\frac{hc}{\lambda kT} \gg 1\right)$ – формула Вина:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 2\pi h \frac{c^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} \tag{8}$$

Эти формулы, строго говоря, выводятся из закона Планка (6) соответствующими предельными переходами, однако они часто применяются на практике, так как имеют более простой вид. Их отличие от планковской кривой изображено на рисунке 3. Для наглядности область больших длин волн показана в увеличенном масштабе.

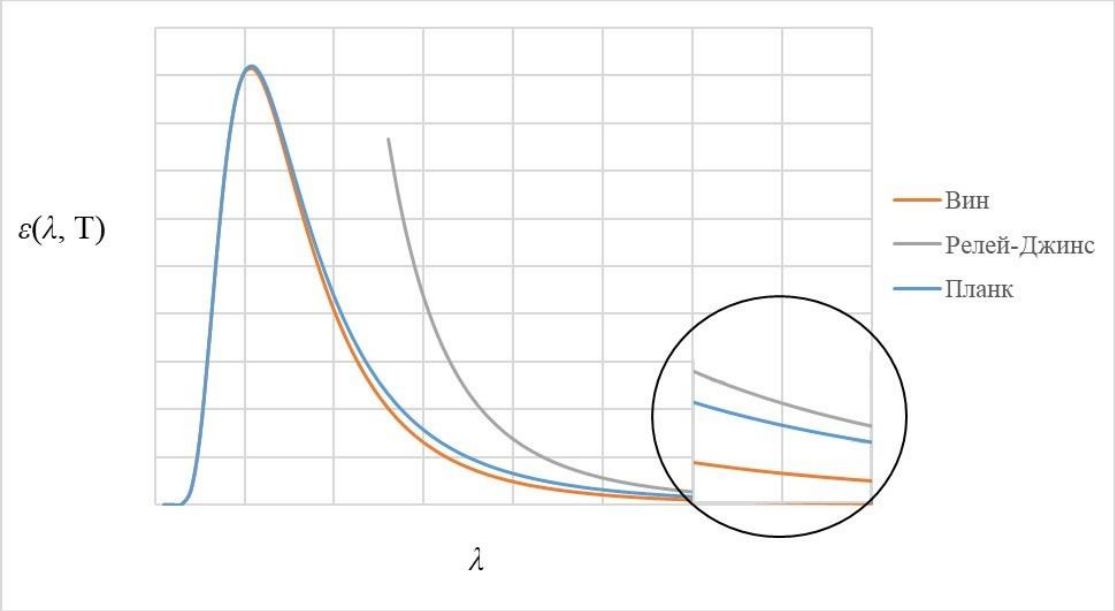

Рис. 3. Испускательная способность АЧТ для одной и той же температуры тела в приближении Вина, Релея-Джинса и Планка

Закон Стефана-Больцмана

Наряду со спектральной испускательной способностью $e(\nu, T)$ важную роль играет интегральная испускательная способность тела $e(T)$, которая определяет **полную** энергию, испускаемую единицей поверхности нагретого тела за одну секунду **во всем интервале длин волн** (частот).

Согласно определению:

$$e(T) = \int_0^\infty e(\nu, T) d\nu,$$
$$e(T) = \int_0^\infty e(\lambda, T) d\lambda. \quad (9)$$

Как уже было сказано выше, для АЧТ интегральная испускательная способность подчиняется закону Стефана-Больцмана (1), который легко выводится интегрированием формулы Планка по всем длинам волн (частотам):

$$\varepsilon(T) = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty 2\pi h \frac{c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} T^4 = \sigma \mathrm{T}^4 \quad (10)$$

Кроме того, теперь удается получить явный вид для постоянной Стефана-Больцмана через другие фундаментальные константы и рассчитать ее численное значение:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (11)$$

Измерение температуры пирометром спектрального отношения

Температура, как известно, – физическая величина, характеризующая меру теплового движения частиц, составляющих вещество, атомов и молекул. Так как эти частицы в свою очередь состоят из заряженных электронов и ядер, то в результате нагретое тело излучает электромагнитные волны. Таким образом, тепловое излучение – это излучение электромагнитных волн за счет внутренней энергии тела.

Отличительной особенностью теплового излучения является тот факт, что оно может находиться в равновесии с излучающим его телом. То есть, по тепловому излучению можно определить температуру самого нагретого тела. Методы измерения температуры, использующие различные свойства теплового

излучения нагретых тел, называются пирометрическими, а соответственно приборы, измеряющие температуру – пирометрами.

В данной лабораторной работе предлагается способ измерения температуры, лежащий в основе работы пирометра спектрального отношения [8].

Суть работы пирометра спектрального отношения такова. Пусть тело нагрето до температуры T. Экспериментально измерив испускательную способность нагретого тела на двух разных длинах волн $e(\lambda_1, T)$ и $e(\lambda_2, T)$, можно составить их отношение:

$$e(\lambda_1, T)/e(\lambda_2, T)=\xi(\lambda_1, \lambda_2, T) \qquad (12)$$

Зная теоретическую зависимость испускательной способности для АЧТ $\varepsilon(\lambda, T)$ (6) и коэффициент поглощения $a(\lambda, T)$, можно, воспользовавшись законом Кирхгофа, переписать левую часть выражения 12 и получить уравнение для нахождения температуры T, по измеренному спектральному отношению ξ и известным длинам волн λ_1 и λ_2:

$$\xi = \frac{\varepsilon(\lambda_1,T)a_w(\lambda_1,T)}{\varepsilon(\lambda_2,T)a_w(\lambda_2,T)} \qquad (13)$$

Решив данное уравнение, можно рассчитать температуру тела. Однако практическое применение данного метода имеет ряд трудностей [8].

Во-первых, необходимо знать аналитическое выражение для спектральной поглощательной способности тела $a(\lambda, T)$, которая дается в литературе в виде таблиц и графиков, зависит не только от вещества, но и состояния излучающей поверхности тела, т.е. представляет собой отдельную непростую задачу. Во-вторых, использование формулы Планка (6) для испускательной способности АЧТ $\varepsilon(\lambda, \mathrm{T})$ в уравнении (13) делает его трансцендентным, и получить формулу для расчета температуры не представляется возможным.

Тем не менее, существуют методы, позволяющие обойти указанные трудности и измерить температуру с удовлетворительной точностью [8], [9]. В данной лабораторной работе они были частично реализованы. Во-первых, в качестве источника излучения была выбрана лампа накаливания с вольфрамовой

нитью. Во-вторых, диапазон длин волн, на которых проводятся измерения яркости лампы, был ограничен видимой частью спектра.

Вольфрам в видимом диапазоне приближенно можно считать серым телом (4), т.е. полагать что его поглощательная способность a_W зависит только от температуры и не зависит от длины волны: $a_W(\lambda_1, T) = a_W(\lambda_2, T)$, что позволяет сократить эти значения в выражении 13.

С другой стороны, температура вольфрамовой нити ограничена температурой плавления вольфрама (~3700 К), и в видимом диапазоне (380-750 нм) выполняется соотношение $hc/\lambda >> kT$, поэтому для испускательной способности АЧТ можно воспользоваться приближением Вина (8).

С учетом вышеперечисленных допущений уравнение 13 упрощается и принимает следующий вид:

$$\xi = \frac{\varepsilon(\lambda_1,T)a_W(\lambda_1,T)}{\varepsilon(\lambda_2,T)a_W(\lambda_2,T)} \approx \frac{2\pi h\frac{c^2}{\lambda_1{}^5}e^{-\frac{hc}{\lambda_1 kT}}}{2\pi h\frac{c^2}{\lambda_2{}^5}e^{-\frac{hc}{\lambda_2 kT}}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp\left(\frac{hc}{kT}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right) \qquad (14)$$

Решив это уравнение, получаем формулу для расчета температуры по спектральному отношению ξ:

$$T = C_2 \cdot \frac{{}^1/_{\lambda_2} - {}^1/_{\lambda_1}}{5 \cdot \ln {}^{\lambda_1}/_{\lambda_2} + \ln \xi} \qquad (15)$$

где C_2=1,439·10^{-2} м·ºК – константа, называемая второй постоянной излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана, проверяемый в данной лабораторной работе, как было сказано ранее, применим только к абсолютно черному телу. В данном случае исследуется вольфрамовая нить лампы, которая вообще говоря не является АЧТ.

Поэтому запишем закон Стефана-Больцмана для интегральной испускательной способности АЧТ и, воспользовавшись законом Кирхгофа,

перейдем под интегралом к испусактельной и поглощательной способностям вольфрама:

$$\varepsilon(T) = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty \frac{e_w(\lambda,T)}{a_w(\lambda,T)} d\lambda = \sigma T^4 \quad (16)$$

Полагая, что вольфрам излучает как серое тело, его поглощательную способность можно вынести из-под знака интеграла, и, воспользовавшись определением интегральной поглощательной способности:

$$a(T) \equiv \frac{e(T)}{\varepsilon(T)} = \frac{\int_0^\infty e(\lambda,T) d\lambda}{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda,T) d\lambda} \quad (17)$$

можно записать:

$$\varepsilon(T) = \frac{e_w(T)}{a_w(T)} = \sigma \mathrm{T}^4. \quad (18)$$

Величину $a(T)$ для различных материалов, в том числе и для вольфрама можно найти в справочной литературе [10].

Табл. 1. Интегральная поглощательная способность вольфрама

T, K	2000	2200	2500	2700	2900	3200
$a_{\mathrm{W}}(T)$	0,259	0,278	0,301	0,315	0,329	0,341

Полагая, что вся подводимая мощность к лампе P тратится ею на излучение, и учитывая, что площадь нити накала лампы равна S, а величины, фигурирующие в формуле (18), отнесены к единице поверхности тела, то суммарная энергия, излучаемая в единицу времени всей нитью накала равна:

$$P = S \cdot e_{\mathrm{W}}(T). \quad (19)$$

Подставляя это выражение в (18), получаем формулу для экспериментального определения постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{P}{S \cdot a_{\mathrm{W}} \cdot T^4}. \quad (20)$$

Согласно закону сохранения энергии, затраты на тепловое излучение должны непрерывно пополняться энергией, подводимой к нити накала лампы от источника электрического тока. Величину этой энергии нетрудно вычислить экспериментально, измеряя величину тока накала $I_{\text{нак}}$ и напряжения накала $U_{\text{нак}}$ на лампе: $P = U_{\text{нак}} \cdot I_{\text{нак}}$.

Для проверки закона Стефана-Больцмана достаточно удостовериться в том, что энергетические затраты на нагрев вольфрамовой нити накала лампы возрастают как T^4.

Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.

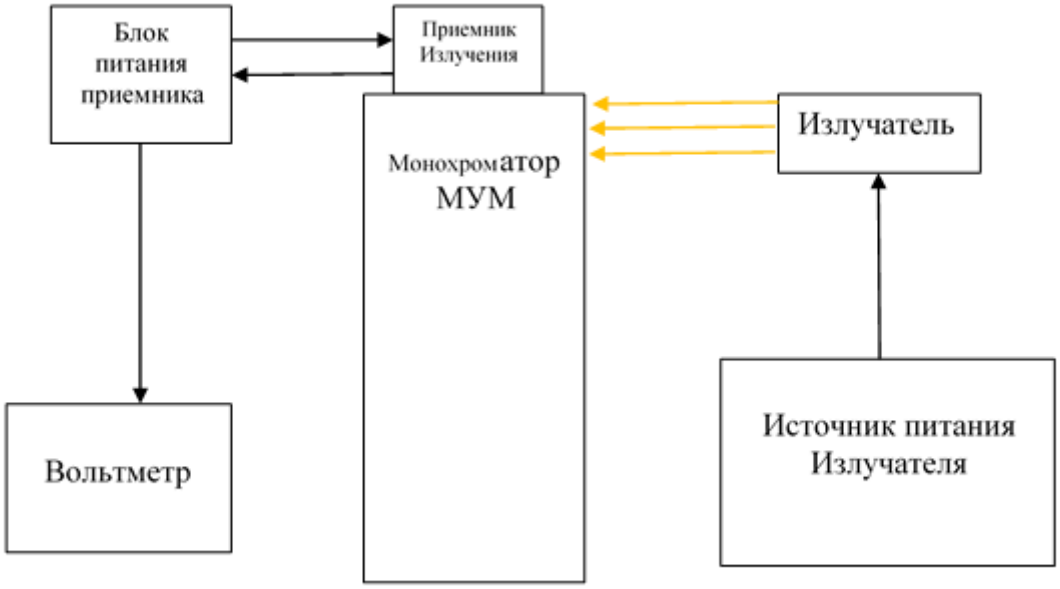

Рис.4 Блок-схема лабораторной установки.

В качестве нагретого тела – Излучателя использована вольфрамовая нить лампы накаливания. Изменение яркости лампы, соответственно и температуры нити накаливания, производится с помощью Источника питания Излучателя. Источник питания – регулируемый блок питания с цифровой индикацией тока $I_{нак}$ и напряжения $U_{нак}$ на выходе.

Свет от Излучателя попадает в Монохроматор (см. Приложение 1), на котором выделяется определенная длина волны λ_i. На выходе Монохроматора Приемник излучения измеряет соответственно яркость на этой длине волны и преобразует ее в напряжение $U_i=U(\lambda_i)$, которое в свою очередь оказывается пропорциональным испускательной способности вольфрамовой спирали $U(\lambda_i, T) \sim e_W(\lambda_i, T)$ (рис. 5).

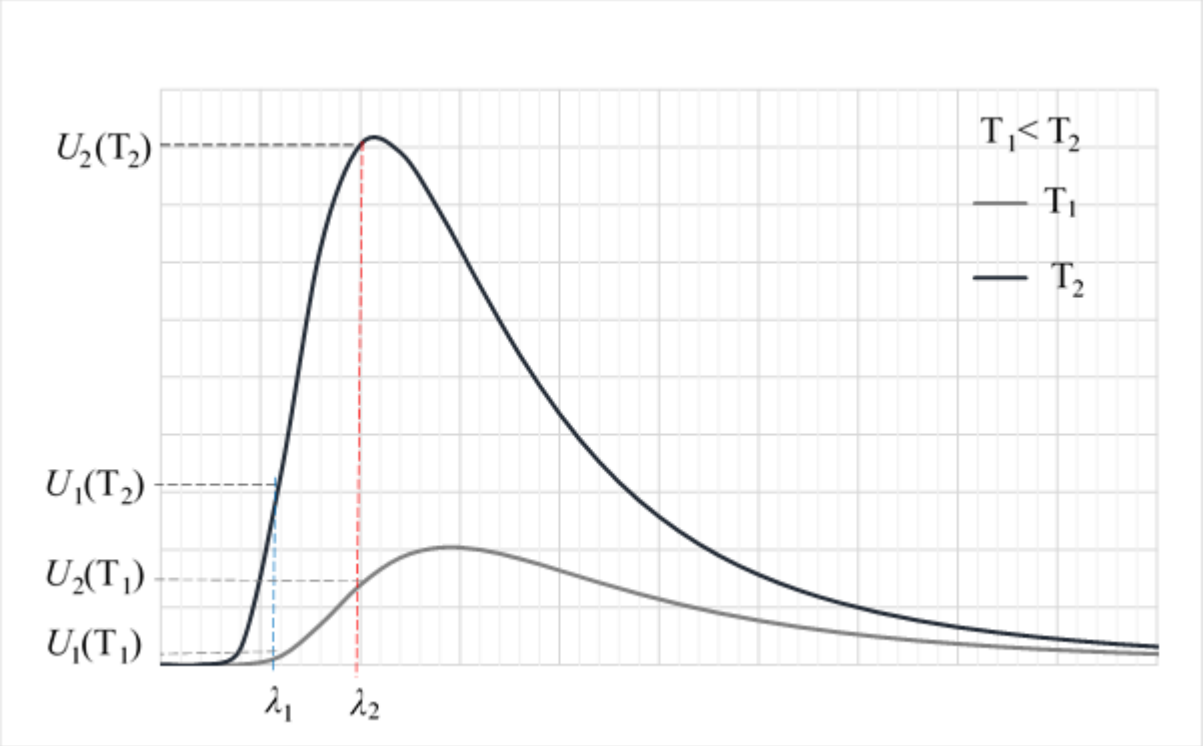

Рис. 5. Схема измерения температуры пирометром спектрального отношения

В качестве Приемника излучения используется кремниевый фотодиод с интегрированным усилителем (усиление К=10^7). Напряжение U_i на выходе усилителя измеряется Вольтметром.

До начала измерений необходимо зафиксировать величину «темнового сигнала» $U_т$, т.е. значение напряжения при отсутствии излучения, и учитывать это значение при расчете температуры T. «Темновой сигнал» особенно влияет при измерениях на малых мощностях лампы в коротковолновом диапазоне.

Для вычисления постоянной Стефана-Больцмана (20) необходимо знать не только значения мощности P, температуры T и площади нити накала лампы S, но и интегральный коэффициент излучения вольфрама $a_W(T)$ (Таблица 1).

При расчетах можно воспользоваться зависимостью коэффициента вольфрама от температуры T (°К), полученной как аппроксимационная прямая при графическом построении данных таблицы 1:

$$a_W(T)=(0{,}7\cdot T+1248)\cdot 10^{-4} \qquad (21)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

До начала измерений оформить шаблон таблицы экспериментальных данных и расчета температуры (Таблица 2).

Таблица 2.

$U_т$=_____В, λ_1=_____нм, λ_2=_____нм.

№ п/п	$U_{нак}$, В	$I_{нак}$, А	P, Вт	U_1, В	U_2, В	U_1- $U_т$, В	U_2- $U_т$, В	ξ, ед.	T, К
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

Обозначения в таблице:

$U_{нак}$, $I_{нак}$ – напряжение и ток на лампе;

$P= U_{нак} \cdot I_{нак}$ – мощность, подводимая к лампе;

U_1, U_2 - напряжение с приемника излучения на соответствующих длинах волн: $U_1= U(\lambda_1)$, $U_2=U(\lambda_2)$;

$U_т$ – «темновой» ток;

$\xi=(U_1- U_т)/(U_2-U_т)$ – «спектральное отношение» с учетом «темнового» тока;

$T = C_2 \cdot \frac{1/\lambda_2 - 1/\lambda_1}{5 \cdot \ln \lambda_1/\lambda_2 + \ln \xi}$ – температура нити накала;

$C_2=1{,}439 \cdot 10^{-2}$ м·°К – вторая радиационная постоянная.

ПРИМЕЧАНИЕ. Значения λ_1 и λ_2 должны быть выбраны из диапазона 450-670 нм, при этом $\lambda_1 < \lambda_2$, и их разность должна быть как можно большей, для уменьшения погрешности расчета температуры.

Порядок проведения измерений

1. Включить Вольтметр и Блок питания приемника в сеть 220 В, 50 Гц.
2. Записать в Таблицу 2 значение $U_т$ (В) – «темновое» напряжение.

3. Включить Источник питания Излучателя в сеть 220 В.

4. Вращением ручки установить на Монохроматоре длину волны λ_1.

5. Ручками «Грубо», «Тонко» регулировки напряжения установить на Источнике питания Излучателя напряжение $U_{нак}$, при котором напряжение $U_1(\lambda_1)$ не менее чем в два раза превышает «темновое» $U_т$.

6. Записать в Таблицу 2 значения $U_{нак}$ и $I_{нак}$ – показания на Источнике питания Излучателя и U_1 – показания Вольтметра.

7. Изменить на Монохроматоре значение длины волны на λ_2.

8. Записать в Таблицу U_2 – показания Вольтметра.

9. Увеличить мощность, подводимую к Излучателю, для чего вращением ручек регулировки напряжения на Источнике питания Излучателя увеличить значение напряжения $U_{нак}$ и, соответственно, тока $I_{нак}$.

10. Записать соответствующие данной мощности на лампе показания Вольтметра U_1, U_2 для тех же самых длин волн λ_1 и λ_2.

11. Заполнить таким образом Таблицу 2, меняя мощности на лампе (максимальное значение $U_{нак}$=13,2 В).

Обработка результатов измерений.

Для расчета константы Стефана-Больцмана, воспользоваться результатами Таблицы 2 и заполнить Таблицу 3. Значение площади нити накала принять равным $S = (10\pm1)\cdot10^{-6}$ м^2.

Таблица 3

№ п/п	P, Вт	T, К	$a_w(T)$	$\sigma=P/(S\cdot a_w\cdot T^4)$, ºВт·м^2·К$^{-4}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

По данным Таблицы 3 вычислить среднее значение постоянной Стефана-Больцмана и среднеквадратическое отклонение результатов ее измерения. Представить конечное значение с учетом погрешности и сравнить его с табличной величиной. Сделать вывод по лабораторной работе.

Приложение 1. Монохроматор МУМ

Монохроматор универсальный малогабаритный (МУМ) предназначен для выделения монохроматического излучения, исследования источников света, приемников излучения решения аналитических задач в области спектра от 200 нм до 800 нм.

Основные оптические элементы монохроматора смонтированы в алюминиевом корпусе. Оптическая схема монохроматора приведена на рисунке 6.

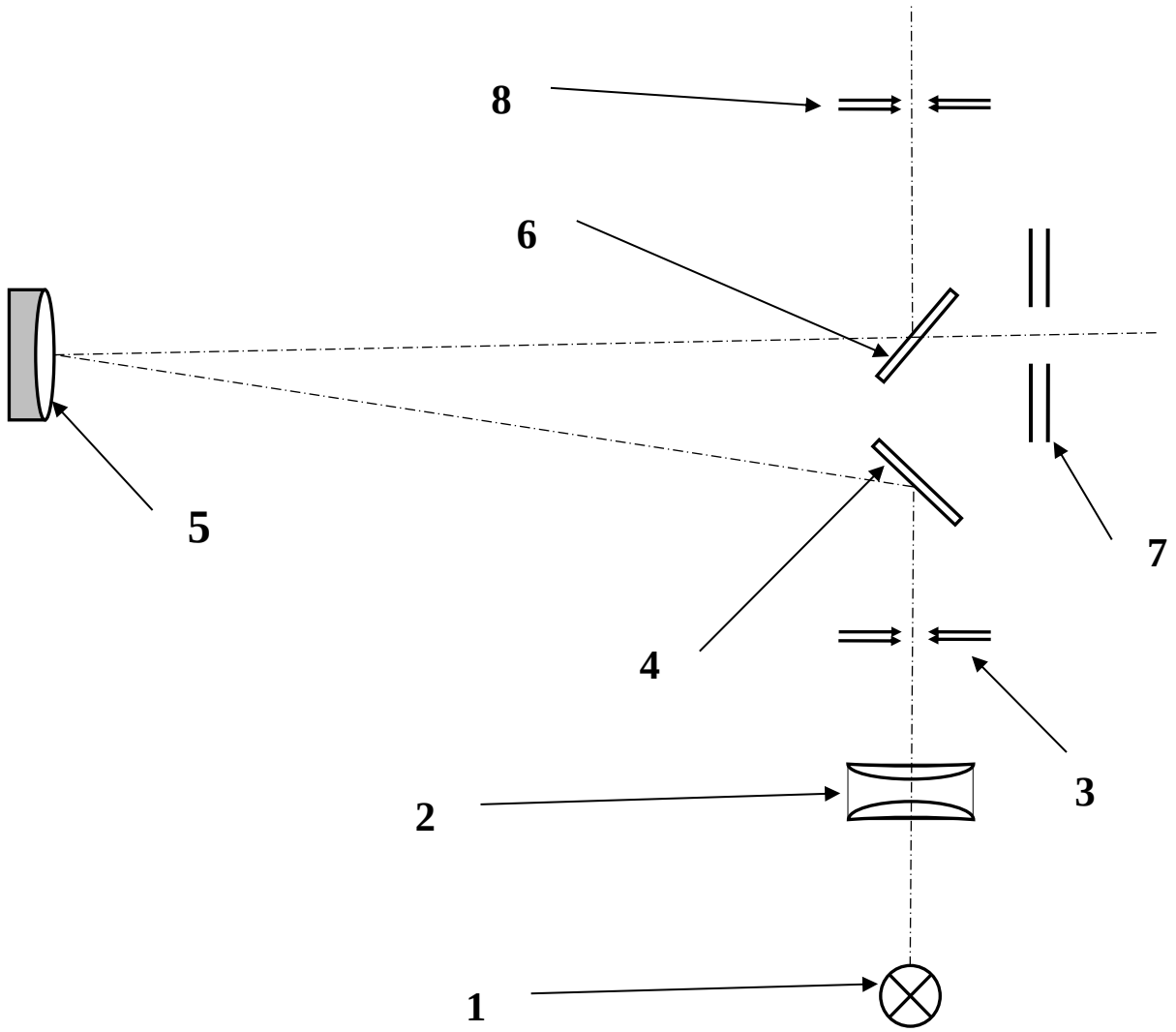

Рисунок 6. Оптическая схема монохроматора МУМ.

Излучение от лампы **1** через конденсор **2** попадает на входную щель **3** и посредством зеркала **4** заполняет дифракционную решетку **5**, которая выполняет роль фокусирующего и диспергирующего элемента. В монохроматоре МУМ применена решетка с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами.

Дифрагированное решеткой излучение направляется на выходную щель (окно) **7** (при выведенном плоском зеркале **6**) или на выходную щель **8** (при введенном зеркале **6**). Изменение положения зеркала **6** осуществляется с помощью рукоятки.

Сканирование спектра производится поворотом решетки **5** вокруг оси на угол **α** в пределах 6º54'÷28º44'. Закон движения решетки обеспечивается синусным механизмом, в котором для перемещения опорной поверхности решетки служит винт.

Система зубчатых передач связывает синусный механизм с рукояткой управления и цифровым механическим счетчиком на торцевой стенке монохроматора. Счетчик позволяет устанавливать длину волны с точностью ±0,2 нм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение теплового излучения.
2. Сформулируйте законы теплового излучения.
3. Как можно экспериментально проверить закон Стефана-Больцмана? Почему в данной лабораторной работе используется косвенный метод?
4. Каков принцип работы пирометра спектрального отношения?
5. Какое тело называется абсолютно черным? Что называется энергетической светимостью?
6. Дайте определение интегральной испускательной способности тела.
7. Каким соотношением она связана с энергетической светимостью тела?
8. Что называется коэффициентом поглощения?
9. Как зависит испускательная способность тела от температуры и длины волны?
10. Напишите формулу Планка и получите выражение для постоянной Стефана-Больцмана.
11. В чем заключается закон смещения Вина?
12. Что выражает закон Стефана-Больцмана? Напишите его формулу.
13. Каков физический смысл и размерность постоянных Стефана–Больцмана и Вина?
14. В чем состоит закон Кирхгофа? Как он используется в настоящей работе?
15. Каким образом вы определяли температуру разогретой нити накала?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела: учебник для вузов. В 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М. : Мир, 1979. – Т.1. – 399 с.
2. **Орир, Дж.** Физика: учебник для вузов. В 2 т. / Д. Орир. – М. : Мир, 1981. – Т.2. – 285 с.
3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 т. Т. 3: Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц: учеб. пособие для втузов / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 2006. – 496 с.
4. **Шпольский, Э.В.** Атомная физика. В 2 т. Т. 1. Введение в атомную физику: учебник для вузов / Э.В. Шпольский. – 6-е изд., стер. – М. : Наука, 1984. – 552 с.
5. **Излучательные свойства твердых материалов**: справочник / под ред. А.Я. Шейндлина. – М. : Энергия, 1974. – 472 с.
6. **Свет Д.Я.** Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения / Д.Я. Свет – М. : Наука, 1968. – 240 с.
7. **Блох А.Г.** Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Н.Л. Рыжков – М. : Энергоиздат, 1991. – 432 с.
8. **А.Фрунзе**. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения/ Фотоника.- вып. 4- 2009- с. 32-37.
9. **Магунов** Выбор спектрального интервала, в котором нагретый непрозрачный объект излучает как серое тело/ Приборы и техника эксперимента, -2010, №6, с. 148-150.
10. **Таблицы физических величин:** справочник под редакцией И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976., с. 107.
11. **Чукин А.В., Денисов А.Ю., Денисова О.В.** Проверка законов теплового излучения: методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс], ЭОР УрФУ, 2017, https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13636/1/Chukin_Denisova_Denisov_%D0%9E%D0%9F%D0%A3%D0%91%D0%9B_%D0%98%D0%97%D0%94.pdf

Электронный текстовый ресурс

Демин Андрей Вячеславович

Денисова Ольга Владимировна

Конев Сергей Федорович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Подготовка к публикации *А.В. Демин*

Компьютерный набор *О.В. Денисова*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Разрешено к публикации 22.06.2019

Электронный формат – pdf

Объем 1,0 уч.-изд. л.

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Информационный портал УрФУ

www.study.urfu.ru