

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра физики

М.А. Бутюгин, А.А. Куколева

ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы КМ–1
«Изучение спектра теплового излучения твердого тела»

*для студентов I–II курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2020

УДК 550.35
ББК 53
Б93

Рецензент:

Камзолов С.К. – д-р техн. наук, профессор

Бутюгин М.А.

Б93

Физика [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы КМ-1 «Изучение спектра теплового излучения твердого тела» / М.А. Бутюгин, А.А. Куколева. – М.: ИД Академии Жуковского, 2020. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов I–II курсов всех направлений и специальностей всех форм обучения.

В учебно-методическом пособии содержатся краткие теоретические сведения, указаны параграфы из рекомендуемых учебных пособий для углубленной проработки теоретического материала, описаны методики проведения экспериментов и обработки полученных результатов, приведен список контрольных вопросов.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 06.03.2020 г. и методического совета 06.03.2020 г.

УДК 550.35
ББК 53

В авторской редакции

Подписано в печать 27.05.2020 г.

Формат 60x84/16 Печ. л. 0,75 Усл. печ. л. 0,7

Заказ № 605/0413-УМП12 Тираж 100 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2020

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КМ-1

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Введение

В настоящее время для диагностики состояния авиационной техники в процессе ее эксплуатации стали широко использовать тепловизионные методы неразрушающего контроля, которые позволяют выявлять дефектные зоны по температурным аномалиям. В основе этих методов диагностики лежит анализ тепловых потоков (температурных полей) исследуемых объектов контроля.

1. Цель работы

Изучение квантовых закономерностей в спектре теплового излучения твердых тел, экспериментальное исследование оптического участка спектра излучения нагретого тела, опытное определение длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности теплового излучения нити лампы.

2. Подготовка к работе

Перед выполнением лабораторной работы изучите основные понятия и законы, относящиеся к тепловому излучению, по учебнику [1]. Необходимо ознакомиться с понятиями тепловое излучение, испускательная и поглощательная способность тела, спектр излучения; знать определение абсолютно черного тела, законы Стефана-Больцмана, Рэлея-Джинса, смещения Вина и гипотезу М. Планка о квантовом характере теплового излучения нагретых тел. Изучите устройство лабораторной установки. Подготовьте ответы на контрольные вопросы для допуска к лабораторной работе.

3. Краткая теория

Все тела при температуре $T > 0$ К испускают электромагнитные волны. Электромагнитное излучение, испускаемое телами за счёт их внутренней энергии, называется **тепловым излучением**.

Тепловое излучение характеризуют следующими величинами.

Энергетическая светимость R , Дж/(сек·м²) – это энергия W , излучаемая единичной площадью за единицу времени:

$$R = \frac{dW}{dt dS} \quad (1)$$

Светимость R – интегральная характеристика, т.к. учитывает энергию, излучаемую по всем длинам волн λ от 0 до ∞ . Для описания распределения энергии излучения по длинам волн (частот) служат спектральные характеристики.

Излучательная (испускательная) способность – это энергия, излучаемая единичной площадью в единицу времени в единичном интервале длин волн r_λ (или частот - r_ν):

$$r_\lambda = \frac{dW}{dt \cdot dS \cdot d\lambda} \text{ или } r_\nu = \frac{dW}{dt \cdot dS \cdot d\nu}. \quad (2)$$

Поглощательная способность тела – это безразмерная величина a_λ (или a_ν), показывающая, какая доля падающей на поверхность тела энергии ЭМВ с частотами от λ до $\lambda + d\lambda$ поглощается им:

$$a_\lambda = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \leq 1. \quad (3)$$

Тела, у которых $a_\lambda = 1$ (поглощают все упавшее на них излучение), называются **абсолютно черными (АЧТ)**. Тело, у которого коэффициент поглощения электромагнитного излучения меньше единицы и не зависит от длины волны, называют **серым телом** ($a_\lambda < 1$). Для абсолютно черных тел зависимость r_λ от длины волны при заданной температуре T имеет вид, показанный на рис. 1. Эта зависимость характеризует распределение энергии теплового излучения по длинам волн и называется *спектром теплового излучения*, а ее график - *спектральной кривой*.

В 1900 г. Рэлеем и Джинсом была сделана попытка объяснить спектр теплового излучения на основе классических представлений о непрерывном характере электромагнитного излучения. Однако полученная ими закономерность $r_\lambda \sim (\lambda)^{-4}$ (при температуре $T = const$) принципиально расходится с экспериментом в коротковолновой части спектра (рис. 1).

В связи с этим М. Планк выдвинул гипотезу о том, что процесс излучения нагретыми телами имеет не непрерывный, а дискретный (квантовый) характер. При этом энергия E кванта излучения зависит от его частоты ν по формуле:

$$E = h\nu, \quad (4)$$

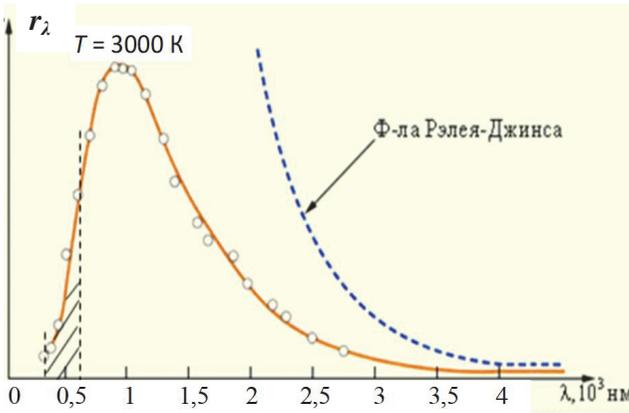


Рис.1а. Спектр излучения АЧТ ($T = 3000 \text{ К}$).

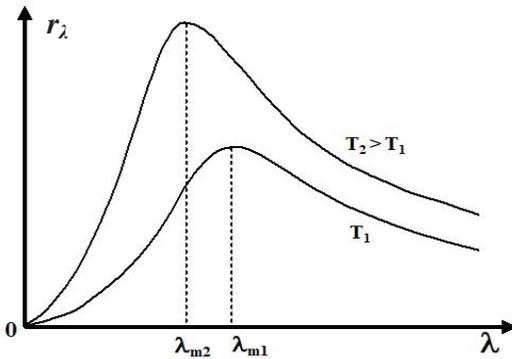


Рис 1б. Спектр излучения АЧТ при разных температурах.

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка. Исходя из этих представлений, М. Планком была получена спектральная функция $r_\lambda = f(\lambda, T)$, хорошо совпадающая с экспериментом во всем диапазоне длин волн:

$$r_\lambda(T) = \frac{2\pi h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (5)$$

График этой функции (так называемая, спектральная кривая) представлен для температуры 3000 К на рис. 1а (сплошная линия).

Квантовые закономерностей теплового излучения наиболее выражены в коротковолновом участке спектра $r_\lambda(T)$ (выделенный диапазон слева от максимума на рис. 1а). На этом участке длина волны достаточно мала, и энергия излучаемых квантов света ($E = h\nu = hc/\lambda$) значительно превышает среднюю тепловую энергию атомов

$$E \gg kT, \quad (6)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана.

Именно квантовым характером теплового излучения объясняется резкое расхождение эксперимента и классического закона Рэлея-Джинса в области малых длин волн λ .

Из формулы Планка можно вывести законы излучения АЧТ (закон Стефана-Больцмана, смещения Вина, Рэлея-Джинса), которые ранее были получены экспериментально.

Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость АЧТ прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$R = \sigma T^4, \quad (7)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана.

Для «серого» тела закон Стефана-Больцмана можно записать как

$$R = \alpha \sigma T^4, \quad (8)$$

где $\alpha < 1$ – это постоянная, называемая коэффициентом черноты тела (или коэффициентом излучения). Следовательно, тепловое излучение любого тела в любой области спектра всегда меньше, чем тепловое излучение абсолютно черного тела в этой же области спектра и при той температуре. Для сравнения коэффициенты черноты некоторых материалов приведены в конце пособия в таблице Приложения.

Закон смещения Вина

Длина волны λ_m , на которую приходится максимум интенсивности излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (9)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К - постоянная Вина ($\lambda_m \approx 1 \cdot 10^3$ нм для $T = 3000$ К на рис. 1а).

Согласно закону смещения Вина с повышением температуры тела максимум спектральной кривой смещается в сторону меньших длин волн. При этом, согласно закону Стефана Больцмана (7,8), увеличится и энергия излучения – площадь под спектральной кривой станет больше, сама кривая пойдет выше (рис. 1б).

Тела, нагретые до температур окружающего нас мира (от -50 до $+50$ °С) имеют максимум излучения в среднем инфракрасном диапазоне с длинами волн $\lambda = (7-14)$ мкм.

Приборы для дистанционного определения температуры – тепловизоры - используются для оперативной диагностики электромеханического оборудования, коммутационной и электросиловой аппаратуры, поиска протечек, определения источников теплопотерь в помещениях и т.п. Дефекты материала поверхности также приводят к неравномерному ее нагреву. Картина распределения температуры поверхности позволяет определить расположение дефекта. На этом основаны методы неразрушающего контроля материалов.

Принцип работы тепловизора основан на регистрации теплового излучения от исследуемого объекта матрицей, состоящей из фоторезисторов или термопар, которые имеют необходимую спектральную область чувствительности в заданном диапазоне длин волн.

4. Описание установки и методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований оптического участка спектра теплового излучения тела в данной работе используется лабораторная установка, принципиальная схема и внешний вид которой показаны на рисунках 2а и 2б.

В качестве источника теплового излучения используется нить лампы накаливания 1. Лампа подключается к источнику тока 2, который питается от сети 220 В.

На передней панели этого источника тока 2 расположены окна со шкалой амперметра (слева) и вольтметра (справа), которые показывают ток накала нити и напряжение. Плавная регулировка тока и напряжения на лампе осуществляется ручками, расположенными под соответствующей шкалой.

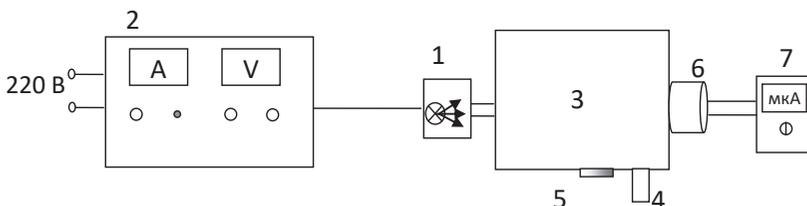


Рис. 2а. Схема установки

Излучение источника 1 поступает на входное отверстие спектроскопа (монохроматора) 3. Диапазон длин волн анализируемого участка спектра можно плавно изменять с помощью вращения ручки 4 (значение длины волны отображается на шкале 5). Монохроматический луч из спектроскопа (монохроматора) 3 попадает на светочувствительный датчик 6 (фотосопротивление). Чувствительность используемого фотосопротивления максимальна в анализируемом диапазоне длин волн видимого света ($0,5 \div 0,7$) мкм. Величина тока, протекающего через фотодатчик 6 при попадании на него потока света, регистрируется цифровым мультиметром 7. На рис. 2б приведена фотография установки.

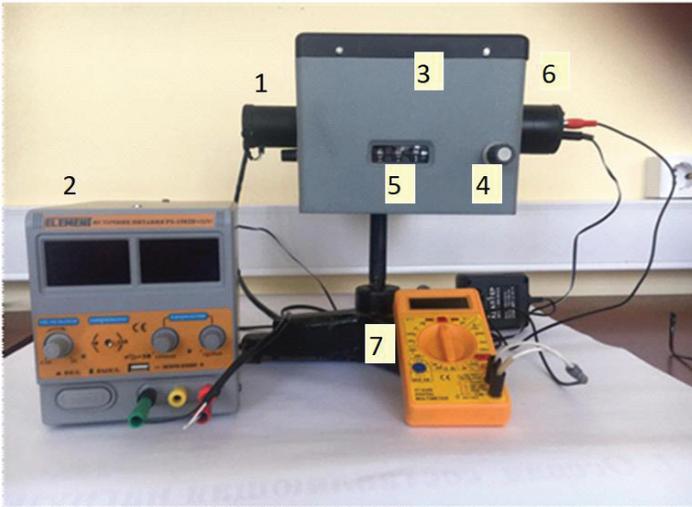


Рис. 2б. Фотография установки (обозначения, как на рис. 2а)

Схема устройства спектроскопа 3 представлена на рис. 3. Излучение от лампы 1 через входную щель падает в виде узкого луча на зеркало 2 и, после отражения, попадает на вогнутую дифракционную решетку 3, которая выполняет роль фокусирующего и дифрагирующего элемента. С помощью ручки 4 можно сместить решетку и направлять на зеркало 2' и выходную щель монохроматора разные участки спектра излучения лампы. Исследуемый диапазон длин волн при этом отображается на шкале 5 в нм (на рис. 2а, б –

ручка и шкала также обозначены цифрами 4 и 5, соответственно). Интенсивность излучения на выходе определяет силу тока I в фотодатчике.

Таким образом, этот ток пропорционален излучательной способности r_λ источника света на выбранной длине волны λ :

$$I \sim r_\lambda(T). \quad (10)$$

Форма кривой зависимости $I(\lambda)$ качественно повторяет спектральную кривую $r_\lambda = f(\lambda)$ при постоянной температуре.

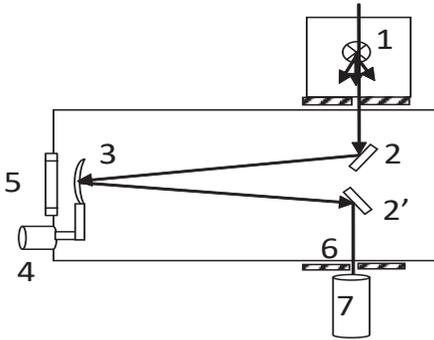


Рис. 3. Схема устройства спектроскопа (монокроматора)

Для расчета температуры излучаемого тела (вольфрамовой нити лампы) воспользуемся законом, определяющим зависимость сопротивления металлического проводника от температуры:

$$R(t) = R_0 (1 + \beta t),$$

где β – температурный коэффициент сопротивления металла (для вольфрама $\beta = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$), R_0 – сопротивление при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (для вольфрама $R_0 = 1,1 \text{ Ом}$).

В установившемся тепловом режиме выделяемая постоянная мощность пропорциональна падению напряжения на рабочем участке вольфрамовой нити. Само сопротивление R найдем по закону Ома:

$$R(t) = U_{\text{сп}} / I_{\text{сп}}. \quad (11)$$

В результате получим температуру излучающего тела:

$$t = \frac{(R(t) - R_0)}{\beta R_0}. \quad (12)$$

5. Порядок выполнения работы

5.1. Предварительная подготовка

1. Лабораторный стенд подключается к электросети под контролем преподавателя или лаборанта.
2. Установите ручку регулировки тока накала на источнике 2 на минимум, повернув ее до упора против часовой стрелки (крайняя левая ручка источника на рис. 2а, б).
3. Включите источник излучения 1 и питание фотосопротивления в сеть 220 В.
4. Ручками регулировки напряжения и тока на источнике 2 установите ток накала спирали $I_{\text{сп}}$ в диапазоне 0,8-1,2 А (напоминаем, что ручки регулировки тока и напряжения расположены под шкалой амперметра и вольтметра, соответственно). Значения тока $I_{\text{сп}}$ и напряжение $U_{\text{сп}}$ запишите в таблицу (нижняя строка).
5. Включите измерительный прибор (мультиметр) 7: переведите его ручку в режим микроамперметра «200 мкА».

5.2. Измерение зависимости силы фототока от длины волны

1. Установив длину волны излучения 600 нм на спектрокопе (ручкой 4 спектрокопа на рис. 2 а,б), определите величину тока фотоэлемента по микроамперметру. Значение I запишите в таблицу.
2. Вращая ручку спектрокопа с шагом $\Delta\lambda = 20$ нм, произведите аналогичные измерения в диапазоне делений $\lambda = 600\div 500$ нм. Полученные данные занесите в таблицу.
3. Повторите измерения по предыдущим пунктам 1, 2 еще дважды. Результаты запишите в таблицу.

Внимание! Ввиду инерционности работы регистрирующего устройства, каждое измерение тока через фотосопротивление необходимо выполнять после установления показаний микроамперметра $\tau \sim 2$ мин.

6. Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы рассчитайте средние значения токов микроамперметра. Данные занесите в таблицу.
2. По полученным экспериментальным результатам постройте график зависимости тока $I_{\text{сп}}$ от длины волны λ (он аналогичен соответствующему фрагменту спектральной кривой $r_{\lambda}(T)$ на рис. 1).

3. Определите по формуле (11) сопротивление, а по (12) - температуру t излучающей нити. Переведите ее в градусы по шкале Кельвина:

$$T = t + 273.$$

4. Рассчитайте по формуле (9) длину волны, соответствующую максимуму спектра теплового излучения вольфрамовой нити лампы λ_m и запишите ее в таблицу.

5. Для среднего значения используемой в работе длины волны $\lambda = 600$ нм и известной температуры источника T проверьте выполнение неравенства (6).

6. По результатам эксперимента сделайте выводы.

Таблица

$\lambda \cdot 10^{-9}$ м	600	580	560	540	520	500
$1/\lambda \cdot 10^{-9}$ м						
I , мкА:	1					
	2					
	3					
I_{cp} , мкА						
$\ln(I_{cp})$						
$I_{cp} = \underline{\hspace{1cm}}$ А,						$U_{cn} = \underline{\hspace{1cm}}$ В
$T = \underline{\hspace{1cm}}$ К,						$\lambda_m = \underline{\hspace{1cm}}$ нм

7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Дайте определение теплового излучения. Каковы его свойства?
2. Какое тело называется абсолютно черным?
3. В чем заключается гипотеза М. Планка?
4. Сформулируйте закон Кирхгофа.
5. Запишите закон Стефана-Больцмана и поясните, что он определяет.
6. Какой вид имеет спектральная кривая теплового излучения? Изобразите ее при двух разных температурах (качественно).
7. Почему закон Рэля-Джинса резко расходится с экспериментом в коротковолновой части спектра излучения нагретых тел?
8. Поясните принцип работы лабораторной установки.
9. В какой области спектра проводятся измерения?
10. Как определяется температура источника излучения.

8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2009-2018. §§197, 199, 200.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.5. - М.: Наука. 2010-2019. §§1-4,6,7.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Коэффициенты черноты α различных материалов*

Материал	α
Алюминий полированный	0,05
Алюминий, сильно окисленная поверхность	0,25
Алюминий, шероховатая поверхность	0,07
Бетон	0,54
Бронза полированная	0,10
Бронза пористая, шероховатая	0,55
Вольфрам	0,05
Железо, блестящая травленная поверхность	0,16
Железо, горячая прокатка	0,77
Железо, окисленная поверхность	0,74
Кирпич обычный	0,85
Кирпич огнеупорный, шероховатый	0,94
Латунь полированная	0,03
Латунь, тусклая поверхность	0,22
Лед	0,97
Медь окисленная	0,65
Медь полированная	0,01
Мерзлый грунт	0,93
Снег	0,80
Сталь листовая, катаная	0,56
Сталь ржавая	0,69

*) <https://www.icsgroup.ru/library/consult/detail.php?NUM=301>