



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Лабораторная работа № 018

«Изучение законов теплового излучения»
по дисциплине

«Физика»

Авторы
Ершов И. В.,
Жданова Т. П.,
Кудря А. П.,
Лемешко Г. Ф.,
Холодова О. М.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Методические указания содержат краткое описание законов теплового излучения и описание пирометрического метода измерения температуры раскаленных тел.

Предназначены для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел <<Оптика>>).

Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Ершов И.В.

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Жданова Т.П.,

ст. преподаватель кафедры «Физика»
Кудря А.П.,

к.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика»
Лемешко Г.Ф.,

доцент кафедры «Физика» Холодова О.М.



Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Теоретическая часть | 4 |
| Законы теплового излучения | 5 |
| Описание измерительной установки | 7 |
| Методика измерения температуры | 8 |
| Порядок выполнения работы | 9 |
| Контрольные вопросы | 11 |
| Приложение | 12 |
| Рекомендуемая литература | 12 |

Цель работы: 1) измерение температуры раскалённого тела;
2) определение степени черноты реального тела.

Оборудование: измерительная установка, оптический пирометр.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется **тепловым (температурным) излучением**. Тепловое излучение является **равновесным**. Оно присуще всем телам при любой температуре, выше абсолютного нуля.

Энергетическая светимость тела - это количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела ($S = 1 \text{ м}^2$) в единицу времени ($t = 1 \text{ с}$) во всем диапазоне длин волн:

$$R = \frac{dW}{dS \cdot dt} = \frac{dP}{dS},$$

где dP - мощность излучения.

Энергетическая светимость является функцией температуры.

Единица измерения энергетической светимости тела:

$$[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) – $r(\lambda, T)$ - это энергия, излучаемая с единицы поверхности тела в единицу времени вблизи данной длины волны λ в единичном интервале длин волн:

$$r(\lambda, T) = \frac{dW}{d\lambda \cdot dS \cdot dt}.$$

Связь между энергетической светимостью R и спектральной плотностью энергетической светимости $r(\lambda, T)$:

$$R = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda.$$

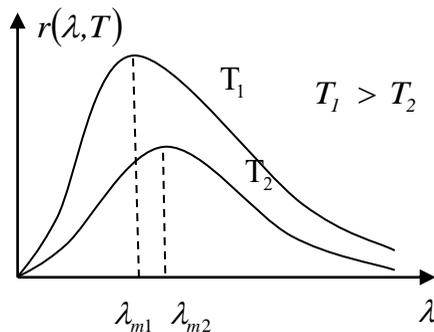


Рис.1

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость

спектральной плотности энергетической светимости от длины волны и температуры. По мере возрастания температуры положение максимума функции $r(\lambda, T)$ смещается в область коротких длин волн. Графически энергетическая светимость R равна площади, ограниченной графиком функции $r(\lambda, T)$.

Монохроматический коэффициент поглощения (поглощательная способность) $\alpha(\lambda, T)$ показывает, какая доля от общего потока энергии вблизи данной длины волны поглощается телом.

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} . \quad (1)$$

Значение $\alpha(\lambda, T)$ зависит от длины волны, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности.

Если тело абсолютно не поглощает электромагнитную энергию, то оно называется **абсолютно белым телом**:

$$\alpha(\lambda, T) = 0 .$$

Если тело поглощает абсолютно всю, падающую на него электромагнитную энергию, то оно называется **абсолютно черным телом**:

$$\alpha(\lambda, T) = 1 .$$

В природе не существует абсолютно белых и абсолютно чёрных тел. Для реальных тел $0 < \alpha(\lambda, T) < 1$, и они называются **серыми**.

ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Закон Кирхгофа

Отношение спектральной плотности энергетической светимости тела (испускательной способности) $r(\lambda, T)$ к его *монохроматическому коэффициенту поглощения* (поглощательной способности) $\alpha(\lambda, T)$ есть величина постоянная, не зависящая от природы тела и равна универсальной функции Кирхгофа:

$$\frac{r(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = f(\lambda, T) . \quad (2)$$

Соотношение (2) справедливо для всех тел, в том числе и для абсолютно чёрных ($ЧТ$), для которых поглощательная способность равна единице, т.е. $\alpha(\lambda, T)_{ЧТ} = 1$. Поэтому можно записать:

$$\frac{r(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = r(\lambda, T)_{ЧТ}, \quad (3)$$

т.е. отношение спектральной плотности энергетической светимости тела (испускательной способности) $r(\lambda, T)$ к его монохроматическому коэффициенту поглощения (поглощательной способности) $\alpha(\lambda, T)$ не зависит от природы тела и равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r(\lambda, T)_{ЧТ}$.

Из формулы (3) получаем:

$$\frac{r(\lambda, T)}{r(\lambda, T)_{ЧТ}} = \alpha(T). \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо для всех длин волн и температур, поэтому можно записать

$$\frac{R(\lambda, T)}{R(\lambda, T)_{ЧТ}} = \alpha(T), \quad (5)$$

где $R(\lambda, T)$ - энергетическая светимость серого тела,

$R(\lambda, T)_{ЧТ}$ - энергетическая светимость чёрного тела,

$\alpha(T)$ - степень черноты тела, зависящая от материала тела, состояния его поверхности и температуры.

Закон Стефана-Больцмана

Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его термодинамической температуры.

$$R_{ЧТ} = \sigma T^4, \quad (6)$$

где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Закон смещения Вина

Длина волны λ_m , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре T :

$$\lambda_m = b / T, \quad (7)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина, полученная экспериментально.

Из выражения (7) следует, что по мере возрастания температуры положение максимума функции $r(\lambda, T)$ смещается в область коротких длин волн. Поэтому уравнение (7) называется *законом смещения* (см. рис. 1).

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

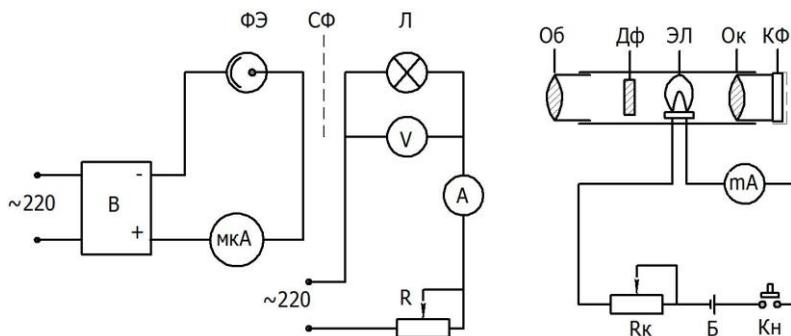


Рис. 2

В комплект установки входят:

- 1) исследуемая лампа Л, в цепь которой включены вольтметр V, амперметр А и реостат R;
- 2) фотоэлемент ФЭ, микроамперметр мкА, подключенные к высоковольтному выпрямителю В;
- 3) оптический пирометр и аккумулятор Б.

В электрическую схему пирометра входят: эталонная лампа ЭЛ, миллиамперметр мА, проградуированный в градусах Цельсия по излучению абсолютно черного тела; кольцевой реостат R_k , с помощью которого регулируют ток в лампе.

Электрическая цепь замыкается нажатием кнопки Кн, укрепленной в нижней части корпуса.

Миллиамперметр установлен на вертикальной стенке в верхней части корпуса, а кольцевой реостат – в крышке корпуса.

Оптическую схему пирометра составляют объектив Об, окуляр ОК, дымчатый фильтр ДФ, красный светофильтр КФ. Между объективом и окуляром установлена нить эталонной лампы ЭЛ, изогнутой в форме дуги.

Дымчатый фильтр вводится поворотом рукоятки, укрепленной в верхней части корпуса пирометра. Красный светофильтр укреплен в поворотной обойме окуляра.

В данной лабораторной работе спираль исследуемой лампы можно считать серым телом. В равновесном состоянии вся электрическая мощность, подводимая к спирали лампы, излучается. Поэтому энергетическая светимость спирали лампы

$$R(T) = \frac{P}{S} = \frac{I \cdot U}{S}, \quad (8)$$

где $P = I \cdot U$ - мощность лампы.

Подставляя (6) и (8) в (5), получим

$$\alpha(T) = \frac{I \cdot U}{S \cdot \sigma \cdot T^4} \quad (9)$$

где I – сила тока в лампе; U – напряжение на зажимах лампы при определенной температуре; S – площадь поверхности спирали лампы, T - термодинамическая температура накала нити, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температуру раскаленной до свечения спирали исследуемой лампы определяют яркостным методом при помощи оптического пирометра. Этот метод основан на фотометрическом сравнении яркости спирали исследуемой и эталонной ламп.

Сравнение яркостей производится в монохроматическом свете с длиной волны $\lambda = 660 \text{ нм}$ через красный светофильтр КФ.



а



б



в

Изображение спирали исследуемой лампы, даваемое объективом пиромет-

ра, совмещают с плоскостью нити эталонной лампы. Тогда в поле зрения окуляра будет видна нить эталонной лампы на фоне спирали исследуемой лампы. Яркость нити эталонной лампы зависит от величины тока в ней. При измерении температуры ток в нити эталонной лампы регулируют до тех пор, пока она не исчезнет на фоне раскаленной спирали исследуемой лампы (рис. 3в). В этот момент яркостная температура нити равна яркостной температуре спирали, действительная температура реального физического тела будет выше яркостной температуры, показываемой оптическим пирометром.

Под **яркостной температурой** реального тела понимают такую температуру *абсолютно черного* тела, при которой его монокроматический коэффициент поглощения $r(\lambda, T_{\text{ярк}})_{\text{чТ}}$ равен монокроматическому коэффициенту поглощения $r(\lambda, T)$ реального тела:

$$r(\lambda, T_{\text{ярк}})_{\text{чТ}} = r(\lambda, T),$$

где T – действительная (термодинамическая) температура тела.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку в сеть.
2. Определить цены делений амперметра C_I и вольтметра C_U .
3. Подготовить оптический пирометр к измерениям. Для этого необходимо:
 - а) ввести в поле зрения окуляра красный светофильтр КФ;
 - б) вывести из поля зрения дымчатый фильтр ДФ (для этого установить его в положение 1);
 - в) включить цепь питания эталонной лампы нажатием кнопки Кн и, поворачивая кольцо реостата R_k по часовой стрелке (из крайнего левого положения), довести накал нити до температуры $\approx 1000^\circ\text{C}$;
 - г) перемещением тубуса окуляра ОК добиться четкого изображения нити эталонной лампы;
 - д) направить объектив пирометра на исследуемую лампу и, перемещая тубус объектива, добиться четкого изображения ее спирали. При этом пирометр необходимо расположить так, чтобы изображение спирали исследуемой лампы полностью перекрывало вершину нити эталонной лампы.

4. По заданию преподавателя установить первое значение тока в цепи исследуемой лампы. Записать показания амперметра и вольтметра в таблицу.

5. Плавно вращая кольцо реостата пирометра, изменять яркость дуги до тех пор, пока ее вершина не исчезнет на фоне спирали эталонной лампы (см.рис.3). Записать показания пирометра - $t_{\text{ярк}}$ (яркостная температура). **Показания берутся по нижней шкале.**

6. Пользуясь графиком поправок температур $\Delta t = f(t_{\text{ярк}})$ (см.**ПРИЛОЖЕНИЕ**) записать поправку Δt , соответствующую измеренной яркостной температуре.

7. По формуле $t = t_{\text{ярк}} + \Delta t$ найти действительную температуру t .

8. По абсолютной шкале температур действительная температура равна: $T = (t + 273)K$.

9. Степень черноты спирали лампы $\alpha(T)$ вычислить по формуле (9).

10. Измерения и вычисления, изложенные в п. 4-9, произвести для 6 -10 значений тока в цепи исследуемой лампы.

11. **Внимание!** При повышении температуры до $1400^{\circ}C$ во избежание перегрева нити перед лампой устанавливается дымчатый фильтр ДФ (положение 2), уменьшающий видимую яркость излучения объекта, а отсчет яркостной температуры производится **по верхней шкале пирометра.**

12. Построить график зависимости $\alpha = f(T)$.

13. По данным одного измерения рассчитать относительную $\delta\alpha$ и абсолютную $\Delta\alpha$ погрешность, допущенную при определении степени черноты тела α , по формулам:

$$\delta\alpha = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta S}{S} + 4 \frac{\Delta T}{T} ,$$

$$\Delta\alpha = \alpha \cdot \delta\alpha ,$$

где $\Delta I = 0,02 A$, $\Delta U = 3B$ - определены по классу точности приборов, $\Delta S = 0,05 \text{ см}^2$, $\Delta T = 10 K$;

Таблица

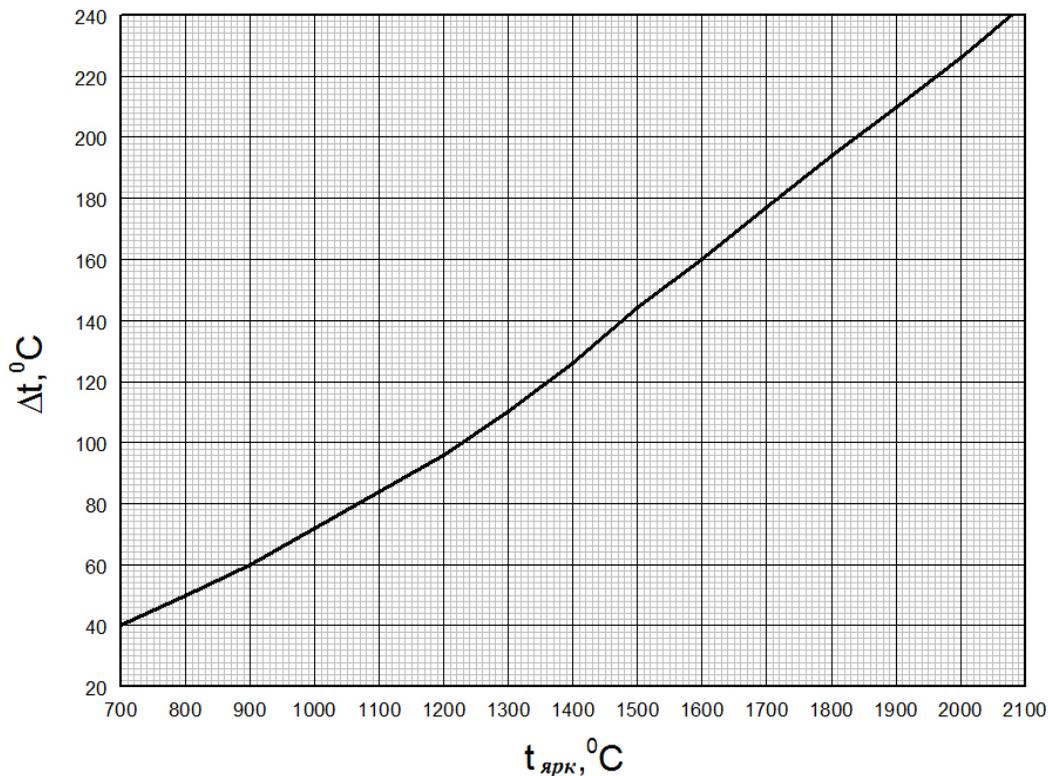
| № | $C_I =$ | | $C_U =$ | | $S =$ | | |
|---|---------|-----|-------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| | I | U | $t_{ярк}$ | Δt | t | T | $\alpha(T)$ |
| | A | B | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | K | - |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем тепловое излучение отличается от других видов излучения?
2. Что называется энергетической светимостью?
3. Что называется спектральной плотностью энергетической светимости (испускательная способность)?
4. Что называется монохроматическим коэффициентом поглощения (поглощательная способность)?
5. Что называется абсолютно черным телом? Серым телом?
6. Что понимают под степенью черноты тела $\alpha(T)$, от каких факторов $\alpha(T)$ зависит?
7. Сформулируйте закон Кирхгофа.
8. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.
9. Сформулируйте закон смещения Вина. Почему он так называется?
10. Объясните принцип работы оптического пирометра. Какую температуру тела называют яркостной?

ПРИЛОЖЕНИЕ

График поправок температур $\Delta t = f(t_{\text{ярк}})$



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т. И. Курс физики.- М.: Высш. шк., 2016
2. Федосеев В. Б. Физика,- Ростов н/Д: Феникс, 2009
3. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике.- М.:Наука, 2006