

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**Методические указания к лабораторной работе № 86
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методические указания к лабораторной работе № 86
по дисциплине «Физика»

Уфа 2013

Составитель Г. П. Михайлов

УДК
ББК

Исследование зависимости теплового излучения абсолютно черного тела от температуры: Методические указания к лабораторной работе № 86 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. Г. П. Михайлов. – Уфа, 2013. – 12с.

Изучается зависимость интегральной энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры и проверяется закон Стефана-Больцмана.

Приведены краткая теория, метод измерения, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы, требования к оформлению отчета и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Волновая оптика. Квантово-оптические явления», на всех направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. Тучков С. В.,
канд. физ.-мат. наук, доц. Шатохин С. А.

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2013

Содержание

Введение.....	4
1. Цель работы	5
2. Задачи	5
3. Теоретическая часть	5
4. Приборы и оборудование.....	9
5. Требования по технике безопасности	10
6. Задание	10
7. Методика выполнения задания.....	10
8. Контрольные вопросы.....	11
9. Требования к содержанию и оформлению отчета.....	12
10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы .	12
Список литературы.....	12

Лабораторная работа № 86

Исследование зависимости теплового излучения абсолютно черного тела от температуры

Введение

Абсолютно черное тело (АЧТ) – тело, поглощающее все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах частот. Понятие об АЧТ является идеализированной физической моделью. Несмотря на название, АЧТ может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Важность исследования зависимости теплового излучения АЧТ от температуры состоит в том, что вопрос о спектре равновесного излучения реальных тел сводится к вопросу об излучении АЧТ. В данной работе изучается зависимость энергетической светимости АЧТ от температуры и экспериментально проверяется закон Стефана-Больцмана.

В результате выполнения данной лабораторной работы формируются следующие **компетенции**:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;

- способность проводить эксперименты по заданной методике, обрабатывать результаты, оценивать их погрешность и достоверность.

Перечисленные компетенции формируются через **умения**:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;

- анализировать результаты опыта;

- оформлять отчет;

а также **владения**:

- теоретическим материалом;
- навыками математической обработки результатов эксперимента с помощью программы обработки электронных баз данных Microsoft Excel.

1. Цель работы

Исследование зависимости интегральной энергетической светимости АЧТ от температуры и проверка выполнения закона Стефана-Больцмана.

2. Задачи

1. Закрепление знаний студентами законов теплового излучения.
2. Овладение методикой определения постоянной Стефана-Больцмана.
3. Приобретение навыков проведения измерений и умения обработки получаемых данных.
4. Изучение зависимости энергетической светимости АЧТ от температуры и определение постоянной Стефана-Больцмана.

3. Теоретическая часть

Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется тепловым излучением. Тепловое излучение, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (т.е. за счет его внутренней энергии) и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких – преимущественно длинные (инфракрасные). Тепловое излучение – практически единственный вид излучения, которое является равновесным. Предположим, что нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей поверхностью. С течением времени, в результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением, наступит равновесие, т.е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.

Количественной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$

$$r_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}}{d\nu}, \quad (3.1)$$

где $dW_{\nu,\nu+d\nu}$ – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за

единицу времени с единицы площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. Единица спектральной плотности энергетической светимости – джоуль на метр в квадрате (Дж/м²).

Все тела в той или иной степени поглощают энергию падающих на них электромагнитных волн. Характеристикой поглощения является спектральная поглощательная способность тела (коэффициент поглощения),

$$a_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{погл}}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}, \quad (3.2)$$

показывающая, какая доля энергии $dW_{\nu,\nu+d\nu}$, доставляемой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с интервалом частот от ν до $\nu + d\nu$, поглощается телом. Спектральная поглощательная способность – величина безразмерная. Величины $r_{\nu,T}$ и $a_{\nu,T}$ зависят от природы тела, его термодинамической температуры и при этом различаются для излучений с разными частотами. Поэтому эти величины относят к определённым значениям T и ν (вернее, к достаточно узкому интервалу частот от ν до $\nu + d\nu$). Во многих случаях необходимо знать полную мощность теплового излучения единицы поверхности тела во всем интервале частот от 0 до ∞ . Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить интегральную энергетическую светимость (ее называют просто энергетической светимостью). Для этого следует просуммировать спектральную плотность энергетической светимости по всем частотам

$$R_{\Sigma} = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu. \quad (3.3)$$

Спектральная поглощательная способность АЧТ для всех частот и температур равна единице ($a_{\nu,T}=1$). АЧТ в природе нет, однако такие тела, как сажа, платиновая чернь, черный бархат и некоторые другие, в определенном интервале частот по своим свойствам близки к ним. Наряду с понятием черного тела используют понятие серого тела – тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела.

Немецкий ученый Кирхгоф, опираясь на второй закон

термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил количественную связь между спектральной плотностью энергетической светимости и спектральной поглотательной способностью тел. Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотательной способности не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией частоты (или длины волны) и температуры (закон Кирхгофа)

$$\frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} = f(\nu, T). \quad (3.4)$$

Для АЧТ $a_{\nu, T} = 1$, поэтому из закона Кирхгофа (3.4) следует, что $r_{\nu, T}$ для АЧТ равна $f(\nu, T)$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $f(\nu, T)$ есть не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости АЧТ. Используя закон Кирхгофа, выражение для энергетической светимости (3.3) можно записать в виде

$$R_{\text{Э}} = \int_0^{\infty} a_{\nu, T} f(\nu, T) d\nu.$$

Для серого тела

$$R_{\text{Э}}^{\text{сер}} = a_T \int_0^{\infty} f(\nu, T) d\nu = a_T R_{\text{Э}}^*,$$

где a_T – коэффициент теплового излучения (степень черноты) серого тела, который меньше единицы и не зависит от частоты,

$R_{\text{Э}}^* = \int_0^{\infty} f(\nu, T) d\nu$ – энергетическая светимость АЧТ (зависит только от температуры).

Австрийский физик Й. Стефан, анализируя экспериментальные данные (1879), и Л. Больцман, применяя термодинамический метод (1884), установили зависимость энергетической светимости $R_{\text{Э}}^*$ АЧТ от температуры. Согласно, закону Стефана-Больцмана,

$$R_{\text{Э}}^* = \sigma T^4, \quad (3.5)$$

т.е. энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры; σ – постоянная Стефана-Больцмана, ее экспериментальное значение равно

$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Явление теплового излучения можно объяснить на основе квантовой природы излучения. По гипотезе Планка энергия осцилляторов, а следовательно, атомов и молекул излучающего тела, обменивающихся энергией с этим осциллятором, может принимать лишь определенные дискретные значения, равные целому числу элементарных порций энергии

$$\varepsilon_0 = h\nu, \quad (3.6)$$

которые он назвал квантами

$$\varepsilon_\nu = n h \nu, \quad (3.7)$$

где $n = 1, 2, \dots$ – любое целое положительное число. В соответствии с этим излучение и поглощение энергии атомами или молекулами должно происходить не непрерывно, а дискретно – отдельными квантами. Пользуясь формулой (3.7) и методами классической статистики среднее во времени значение ε_ν энергии осциллятора, полученное Планком, имеет вид

$$\varepsilon_\nu = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (3.8)$$

а энергетическая светимость абсолютно черного тела $r_{\nu,T}$

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (3.9)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Формула (3.9) прекрасно согласуется с результатами измерений распределения энергии в спектрах излучения АЧТ при самых различных температурах. Из формулы Планка (3.9) можно получить интегральную энергетическую светимость АЧТ и вывести закон Стефана-Больцмана. Из формул (3.3) и (3.9) следует

$$R_{\mathfrak{S}}^* = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu.$$

Произведем замену переменной.

Обозначим через $x = \frac{h\nu}{kT}$, $dx = \frac{h}{kT} d\nu$ и $d\nu = \frac{kT}{h} dx$.

Тогда

$$R_{\text{Э}}^* = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4,$$

где интеграл $\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$.

Поэтому постоянная Стефана-Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}. \quad (3.10)$$

Следовательно, из формулы Планка, зная универсальные постоянные h , k и c , можно вычислить постоянную Стефана-Больцмана σ . Формула Планка не только хорошо согласуется с экспериментальными данными, но и содержит в себе частные законы теплового излучения, а также позволяет вычислить постоянные в законах теплового излучения.

4. Приборы и оборудование

Экспериментальная установка состоит из следующих приборов: электропечи ЭП, приемника излучения (термостолбик ТС), блока управления и индикации (БУИ). Блок-схема установки показана на рис. 4.1.

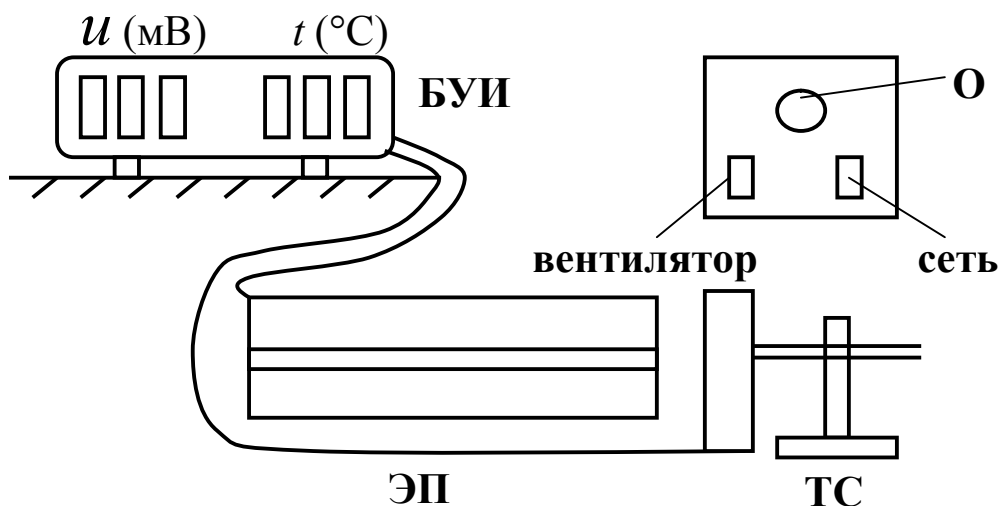


Рис. 4.1

Электропечь состоит из нагревательного устройства, термопары для измерения температуры, регулятора нагрева и вентилятора.

Отверстие O в электропечи, служащее абсолютно черным телом, выведено на переднюю панель. На передней панели размещены также клавиши «Сеть» и «Вентилятор». На передней панели БУИ размещены цифровые трехразрядные индикаторы напряжения термостолбика и температуры электропечи. Термостолбик представляет собой несколько последовательно соединенных термопар. Напряжение термостолбика пропорционально мощности падающего на поверхность излучения, которая, в свою очередь пропорциональна энергетической светимости R_{Σ} отверстия

$$U_T \sim P_{\text{пад.изл.}} \sim R_{\Sigma}. \quad (4.1)$$

Сняв зависимость напряжения термостолбика от температуры электропечи, можно исследовать зависимость энергетической светимости АЧТ от температуры и проверить закон Стефана-Больцмана.

5. Требования по технике безопасности

1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, ее принципом действия.
2. Убедиться, что установка заземлена.
3. Убедиться в исправности сетевых шнуров.
4. Обязательно охладить печь вентилятором в конце работы, т.к. при работе установки происходит нагрев электропечи до 700°C .

6. Задание

Изучение зависимости энергетической светимости АЧТ от температуры.

7. Методика выполнения задания

1. Установить термостолбик на расстоянии 2-3 см от отверстия печи так, чтобы оси диафрагмы термостолбика и отверстия печи совпадали.
2. Включить кнопку «Сеть» на задней панели БУИ (при этом на нем должны высветиться цифры индикатора). Дать установке прогреться 3-5 мин.
3. Включить электропечь кнопкой «Сеть» на ее передней панели. При этом должна загореться лампочка.
4. По цифровым индикаторам измерительного устройства снять с интервалом 50°C зависимость напряжения термостолбика (U_T) от температуры электропечи. Измерения начать с температуры 50°C .

5. По достижении максимальной рабочей температуры 700°C выключить нагреватель и нажать кнопку «Вентилятор». При этом выше кнопки должна загореться лампочка. Охладить электропечь до 27°C и отключить сначала вентилятор, затем кнопкой «Сеть» на задней панели БУИ установку.

6. Результаты измерения занести в таблицу. При вычислении T прибавить поправку $\Delta T = T_{\text{комн.}}$, так как термопара измеряет разность температур излучателя и корпуса электропечи. Температуры T необходимо выразить в термодинамической температурной шкале (в кельвинах (К)) с помощью соотношения $T, K = t, ^\circ\text{C} + 273$.

7. На основе табличных данных построить график зависимости $U_T = f(T^4)$. Через экспериментальные точки провести прямую наилучшим образом приближенную к экспериментальным точкам. Для этого можно воспользоваться например, программой Microsoft Excel для обработки электронных баз данных: в двух столбцах вставить значения T^4 и U_T , далее выбрать опции «Вставка» → «Диаграмма» → «Точечная» и с помощью линии тренда аппроксимировать линейной зависимостью. Линейная зависимость $U_T(T^4)$ свидетельствует о справедливости закона Стефана-Больцмана.

8. Рассчитать постоянную Стефана-Больцмана, учитывая коэффициент пропорциональности $a = 1,9 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ между энергетической светимостью АЧТ и напряжением термостолбика

$$R_e = a \cdot U_T, \quad (5.1)$$

$$\sigma = \frac{R_e}{T^4} = \frac{aU_T}{T^4} = a \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.2)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – отношение ΔU_T к ΔT^4 для любой пары точек зависимости U_T от T^4 .

9. Сравнить полученные значения σ с табличным (3.10).

Таблица

$t, ^\circ\text{C}$	$U_T, \text{ В}$	$T, \text{ К}$	$T^4, \text{ К}^4$

8. Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление теплового излучения? Какова его природа?

2. Каков физический смысл характеристик теплового излучения?
3. В чем заключается закон Кирхгофа для теплового излучения?
4. Как формулируется закон Стефана-Больцмана и квантовая гипотеза Планка.
5. Вывод закона Стефана-Больцмана из формулы Планка.
6. Как экспериментально определить постоянную Стефана-Больцмана?

9. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Краткое изложение теории, основные характеристики теплового излучения, расчетные формулы.
2. Блок-схему установки.
3. Таблицу с экспериментальными результатами.
4. График зависимости U_T от T^4 .
5. Определение по графику значение σ .
6. Вывод, в котором сравнить экспериментальное и теоретическое значения σ и указать возможные причины расхождения.

10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел понятиями спектральной плотности энергетической светимости, законами Стефана-Больцмана и Вина, понимает суть теории М. Планка;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- правильно построил график зависимости U_T от T^4 ;
- составил отчет, соответствующий предъявляемым к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. *Детлаф А. А., Яворский Б. М.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2009.

2. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 3. – СПб.: Издательство «Лань», 2011.
3. *Трофимова Т. И.* Курс физики, – М.: Academia, 2012.

Составитель МИХАЙЛОВ Геннадий Петрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методические указания к лабораторной работе № 86
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2013. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,1. Уч-изд.л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12