

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Проректор-директор ФТИ

_____ В.П.Кривобоков
« ____ » _____ 2012 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА
И ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОГО
ПИРОМЕТРА С ИСЧЕЗАЮЩЕЙ НИТЬЮ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы
О-14 по курсу «Общая физика» для студентов всех
специальностей

Составитель С.И. Борисенко

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 53.01

Определение постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью

: методические указания к выполнению лабораторной работы 0-14 / сост. С.И. Борисенко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 10 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
теоретической и экспериментальной физики ФТИ.

«__» _____ 2012 г.

Зав. кафедрой ТиЭФ
доктор физ.-мат. наук,
профессор

_____ *В.Ф. Пичугин*

Председатель
учебно-методической комиссии _____

С.И. Борисенко

Рецензент

Кандидат физ.– мат. наук,
доцент кафедры ТиЭФ ТПУ
Н.С. Кравченко

© Составление. ГОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический
университет», 2012

© С.И. Борисенко составление, 2012

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных видов излучения тепловое является самым универсальным. В отличие от других видов источником теплового излучения является внутренняя энергия тела, зависящая от температуры. Все тела, температура которых отлична от абсолютного нуля, являются источниками теплового излучения. По этой причине тепловое излучение было изучено исчерпывающим образом, а задача о распределении энергии в спектре абсолютно черного тела сыграла выдающуюся роль в развитии основных идей современной физики. Ее решение привело к открытию универсальной постоянной h и созданию квантовой механики.

Законы излучения абсолютно черного тела находят важное применение при измерении высоких температур, начиная приблизительно с 600°C . Выше 2600°C температуру, вообще измеряют только оптическим способом.

Приборы, служащие для определения температуры на основе измерений теплового излучения, носят название оптических пирометров, а область экспериментальной физики, разрабатывающая принципы измерения температуры оптическими методами, - оптической пирометрией.

Цель работы: экспериментально проверить один из основных законов теплового излучения - закон Стефана-Больцмана и определить значение постоянных Стефана-Больцмана и Планка с помощью пирометра с исчезающей нитью.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Характеристиками теплового излучения являются интегральная и спектральная излучательные способности.

Интегральной излучательной способностью R - называется величина, численно равная количеству энергии, излучаемой ежесекундно единицей поверхности тела по всем направлениям с учетом всех длин волн, испускаемых телом. Интегральную излучательную способность часто называют энергетической светимостью.

Пусть dR - количество энергии, излучаемой ежесекундно единицей поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$. Спектральной излучательной способностью r_{λ} называется величина, численно равная количеству энергии, излучаемой ежесекундно с единицы поверхности

тела по всем направлениям с длинами волн от λ до $\lambda+d\lambda$, рассчитанная на единичный интервал длин волн:

$$r_{\lambda} = \frac{dR}{d\lambda}$$

Из опыта следует, что величина r_{λ} является функцией длины волны и температуры, следовательно, и R также зависит от температуры. Из формулы для r_{λ} следует, что интегральная излучательная способность равняется

$$R_{\lambda} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

Величина r_{λ} , а, следовательно, и величина R зависят также от природы излучателя.

Тела, излучающие электромагнитную энергию, в той или иной степени поглощают энергию, приносимую к ним излучением других нагретых тел. Способность тела поглощать тепловое излучение характеризуется величиной, которая называется спектральной поглощательной способностью, зависящей в общем случае от температуры тела, длины волны падающего излучения, а также от природы тела. Спектральная поглощательная способность a_{λ} показывает, какая доля энергии излучения падающего за единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$ поглощается данной поверхностью. Тело, полностью поглощающее все, падающее на него излучение для все длин волн, называется абсолютно черным. Для него $a_{\lambda} = 1$ для всех длин волн и температур. Для всех прочих, т.е. нечерных тел коэффициент a_{λ} меньше единицы.

Нечерные тела подразделяются на серые и селективные. У серых тел коэффициент поглощения имеет одинаковое для всех длин волн значение и зависит только от температуры и материала тела. У селективных тел коэффициент a_{λ} зависит от длины волны, температуры и материала.

Если тело или система тел находится в адиабатической оболочке в результате термодинамического равновесия каждое тело будет излучать и поглощать одинаковое значение энергии теплового излучения, которое в этом случае называется равновесным. Для равновесного теплового излучения согласно закону Кирхгофа отношение излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же функцией длины волны и

температуры – универсальной функцией Кирхгофа:

$$\frac{r_{\lambda}}{a_{\lambda}} = f(\lambda, T).$$

Поскольку для абсолютно черного тела $a_{\lambda} \equiv 1$, то согласно этому выражению для абсолютно черного тела $f(\lambda, T) = r_{0\lambda}$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа есть не что иное, как спектральная излучательная способность абсолютно черного тела.

Основываясь на гипотезе о квантовой природе излучения, согласно которой энергия теплового излучения с заданной длиной волны принимает только дискретные значения, Планк методами статистической физики показал, что

$$r_{0\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda kT}} - 1}, \quad (2)$$

где h - постоянная Планка, k - постоянная Больцмана, c - скорость света в вакууме.

На основании формул (1) и (2) для интегральной излучательной способности абсолютно черного тела получается выражение

$$R_0 = \int_0^{\infty} \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\frac{hc}{e^{\lambda kT}} - 1}.$$

Результат интегрирования этого выражения приводит к закону Стефана-Больцмана:

$$R_0 = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \cdot T^4 = \sigma T^4, \quad (3)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана. $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$ Согласно этому закону энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени.

Постоянная Стефана-Больцмана была определена опытным путем. Пользуясь известным значением σ , Планк впервые рассчитал постоянную h по формуле:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma}}. \quad (4)$$

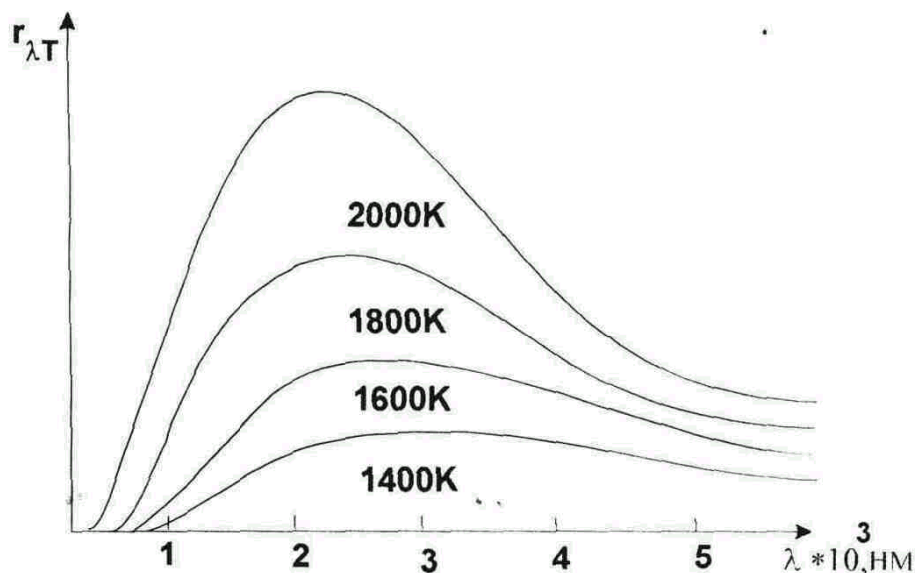


Рис.1. Зависимость спектральной излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах.

Графики зависимости спектральной излучательной способности от длины волны, даваемые формулой (2) для некоторых температур, изображены на рис.1. Площади, ограниченные кривыми графиков, равны величине R .

Из закона Стефана-Больцмана следует, что количество энергии, излучаемой единицей поверхности абсолютно черного тела, находящегося при температуре T , в окружающую среду с температурой T_0 , если среду можно рассматривать как абсолютно черное тело, равно:

$$R_0 = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

Излучение реальных тел подчиняется такой же закономерности, только согласно закону Кирхгофа для каждой длины волны оно в a_λ раз меньше, чем для абсолютно черного тела. На рис.2 представлены графики спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, серого тела и селективного излучателя при некоторой температуре.

Энергетическая светимость реальных тел выражается формулой

$$R = a_T R_0 = a_T \sigma T^4,$$

где a_T - коэффициент черноты данного тела, равный отношению энергетической светимости данного тела к энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре T . Коэффициент черноты a_T зависит от природы тела и от температуры.

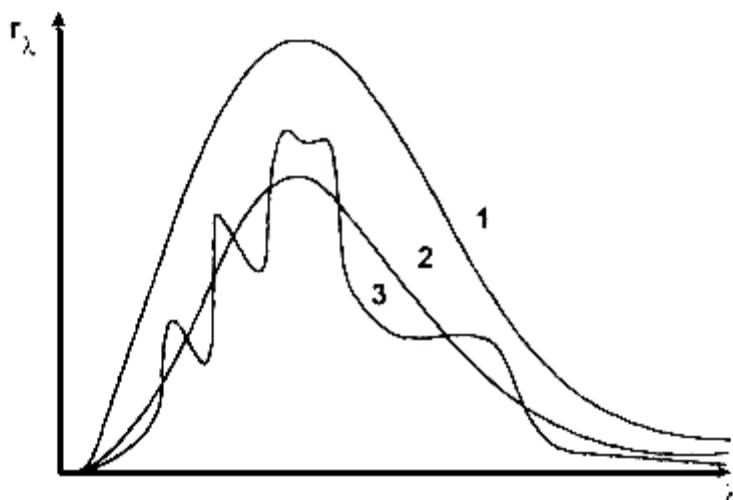


Рис.2. Спектральные распределения излучения абсолютного черного тела – 1, серого тела – 2 и селективного излучателя – 3.

Закон Стефана-Больцмана можно использовать для вычисления коэффициента σ , если определить энергетическую светимость R и соответствующую ей температуру тела T .

Оптические методы измерения температуры основаны на температурной зависимости интегральной и спектральной излучательных способностей. В оптических пирометрах одна из характеристик излучения исследуемого тела сравнивается с соответствующей характеристикой излучения абсолютно черного тела. Причем характеристики излучения могут сравниваться по принципу равенства интегральных и спектральных излучательных способностей, а также по идентичности спектрального состава при определенной длине волны.

Соответственно различают три температуры: энергетическую, цветовую и яркостную.

Энергетической температурой тела называется температура абсолютно черного тела, у которого энергетическая светимость равна энергетической светимости тела.

Цветовой температурой тела называется температура абсолютно черного тела, у которого спектр излучательной способности равен спектру излучательной способности тела.

Под яркостной температурой понимают температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная излучательная способность и спектральная излучательная способность исследуемого тела равны при некоторой длине волны. Обычно температура светящихся объектов измеряется при длине волн $\lambda=660$ нм.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Приборы и принадлежности: пирометр с исчезающей нитью, вольтметр, амперметр, автотрансформатор, пластинка из окиси никрома.

В данной работе измерение температуры раскаленного тела производится при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью, основанного на визуальном сравнении спектральных излучательных способностей раскаленной нити лампы пирометра и исследуемого тела при той же длине волны.

Комплект оптического пирометра состоит из зрительной трубы, миллиамперметра и аккумулятора. Схема его устройства показана на рис.3. Объектив пирометра (3) дает действительное изображение поверхности нагретого тела в месте расположения нити пирометрической лампы (2); (5) - окуляр. Наблюдение ведется через светофильтр (1), пропускающий узкую спектральную полосу длин волн в области **660 нм**. Яркость лампы изменяют, регулируя ток реостатом (6) до исчезновения ее нити на фоне излучающей поверхности. В этот момент, соответствующий совпадению величины излучательной способности нити лампы и исследуемого тела в области длины волны $\lambda=660 \text{ нм}$, делается отсчет яркостной температуры пирометра по шкале миллиамперметра (4). Пирометр предварительно проградуирован по излучению абсолютно черного тела, т.е. предварительно установлено при какой силе тока в лампе она излучает в области $\lambda=660 \text{ нм}$ как абсолютно черное тело при данной температуре. Шкала пирометра градуируется обычно в $^{\circ}\text{C}$ и в случае нечерного тела дает значение его яркостной температуры.

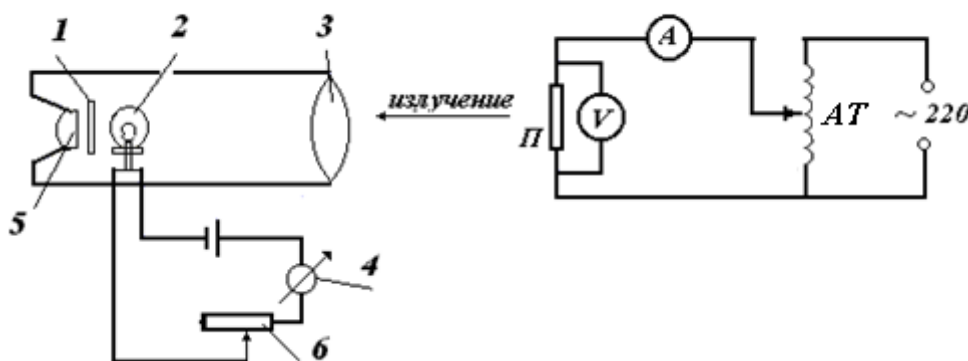


Рис.3. Оптическая схема пирометра и электрическая схема питания пластинки

Яркостная температура тела всегда ниже его истинной термодинамической температуры. Это связано с тем, что любое нечерное тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Для определения истинной температуры из формулы Планка получается следующая расчетная формула:

$$T = \frac{T_{яp}}{1 + \frac{\lambda}{\beta} T_{яp} \ln a_{\lambda}} \quad (5)$$

где λ - длина волны, при которой измеряется яркостная температура, $\beta = \frac{hc}{k} = 0,01432 \text{ м} \cdot \text{град.}$ В табл.1 указаны значения яркостной температуры $T_{яp}$ и истинной T , рассчитанной по формуле (5) для окиси никрома при $\lambda=660 \text{ нм.}$

Табл.1

$T_{яp} \text{ К}$	875	904	948	1017	1075	1130	1184	1243	1295	1352	1404	1467
$T \text{ К}$	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550

В нашей работе нагретым телом, тепловое излучение которого используется для определения σ , служит пластинка из окиси никрома. Температура пластинки измеряется при разных значениях подводимой мощности тока. На рис.3 показана электрическая схема питания нагреваемого тела. Ток, пропускаемый через пластинку, регулируется регулятором напряжения автотрансформатора типа ЛАТР.

Используемый в данной работе метод определения постоянной Стефана-Больцмана предполагает, что вся энергия тока, протекающего через пластинку, превращается в энергию теплового излучения этой пластики. Согласно этому приближению зная силу тока I , измеряемого амперметром, и напряжение на пластике U , измеряемое вольтметром, получаем следующее уравнение

$$IU = \sigma S [a_T T^4 - a_{T_0} T_0^4] \approx \sigma S a_T T^4$$

где S - поверхность излучателя, T_0 - температура окружающей среды. Ясно, что $T_0^4 \ll T^4$, поэтому температурой окружающей среды можно пренебречь. Отсюда для определения постоянной Стефана-Больцмана имеем расчетную формулу

$$\sigma = \frac{IU}{a_T S T^4} \quad (6)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую цепь питания пластинки по схеме рис.3, но не замыкать её.

2. Включить питание пирометра.

3. Перемещая окуляр пирометра, установить его так, чтобы стала отчетливо видна нить пирометрической лампы. Глядя через оптическую систему пирометра на пластинку, с помощью объектива получить ее резкое изображение.

4. Замкнуть цепь питания пластинки. С помощью автотрансформатора AT установить в цепи ток I_1 (значения тока, задаются преподавателем) и записать в таблицу 2 показания вольтметра и амперметра.

Табл.2

№ опыта	U (В)	I (А)	W (Вт)	$T_{яр}$ $^{\circ}C$	$T_{яр}$ К	T К	d (м)	l (м)	S (м)
1									
2									
3									

5. Нажимая кнопки пирометра, изменять яркость нити пирометра до тех пор, пока она не сравняется с яркостью накаливаемой пластинки (нить пирометра исчезнет на фоне пластинки). В этот момент произвести отсчет по шкале пирометра и записать в таблицу значение яркостной температуры $T_{яр}$. Температура измеряется по шкале пирометра, рассчитанной на температуры от $800^{\circ}C$ до $1500^{\circ}C$.

6. С помощью автотрансформатора установить в цепи ток I_2 и снова произвести измерения яркостной температуры пластинки. Затем опыт произвести в третий раз, установив в цепи ток I_3 .

7. Разомкнув цепь, с помощью штангенциркуля измерить линейные размеры пластинки – d – диаметр проволоки; l – длину. За длину пластинки взять расстояние между контактами.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 построить график зависимости истинной температуры T от яркостной $T_{яр}$ для окиси никрома. По графику найти значения истинной температуры пластинки, зная отсчитанные по пирометру значения яркостной температуры для каждого из опытов.

2. По формуле (6) вычислить постоянную Стефана-Больцмана и

найти ее среднее значение. Для пластинки из окиси никрома в интервале температур **800-1500°C**.

3. Вычислить абсолютную и относительную погрешности измерения и записать результат с учетом погрешности.

4. Используя формулу (4), по найденному среднему значению величины σ рассчитать постоянную Планка h .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение тела называется тепловым?
2. Чем тепловое излучение отличается от люминесценции?
3. Какое тепловое излучение называется равновесным?
4. Что называется энергетической светимостью тела или интегральной излучательной способностью?
5. Что называется спектром теплового излучения тела или спектральной излучательной способностью?
6. Как связаны между собой интегральная и спектральная излучательные способности?
7. Что называется поглотительной способностью?
8. В чем смысл закона Кирхгофа для равновесного теплового излучения?
9. Чему равняется универсальная функция Кирхгофа?
10. Какой излучатель называется селективным?
11. Показать на рисунке, как распределяется по спектру энергия излучения абсолютно черного тела и селективного излучателя для некоторой температуры.
12. В чем состоит основной смысл квантовой гипотезы Планка для теплового излучения?
13. Что определяет коэффициент черноты α_T тела?
14. Какая температура тела, определенная оптическими методами, называется энергетической, цветовой, яркостной?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.5 - М.: Наука. 1998. - 368 с.
2. Солоухин Р.И. Оптика и атомная физика. - М.: Наука, 1976, 454 с.

Учебное издание

**Определение постоянной Стефана-Больцмана
и постоянной Планка при помощи оптического пирометра
с исчезающей нитью**

Методические указания к выполнению лабораторной работы 0-14

Составитель С.И.Борисенко

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати _____ 2012. Формат 60х84/16. Бумага
«Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ ____ . Тираж _____ экз.



Национальный исследовательский Томский
политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета
сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту
ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО 

ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru