

Работа 4-8: Определение постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка

Студент _____ группа _____

Допуск _____ Выполнение _____ Защита _____

Цель работы: изучение основных закономерностей теплового излучения и определение постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка.

Приборы и принадлежности: оптический пирометр с исчезающей нитью, латр, амперметр, вольтметр, стабилизатор напряжения, лампа с исследуемой нитью.

Описание установки

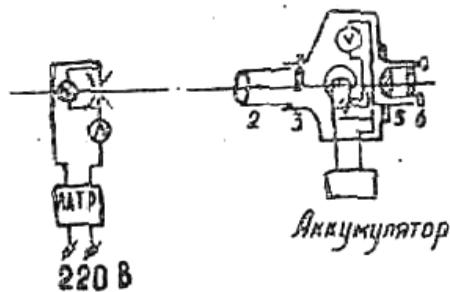


Рис.1.

Объектом исследования является вольфрамовая нить лампы накаливания. Ток в пластинке можно изменять регулятором напряжения – латром (рис. 1). Значение тока и напряжения на вольфрамовой нити лампы накаливания измеряются амперметром и вольтметром, а температура нити – оптическим пирометром.

Основной частью пирометра является дугообразная нить накала, расположенная в фокусе объектива. Пирометр снабжен красным и дымчатым светофильтрами.

Пирометрическая лампа включается в электрическую схему, состоящую из аккумулятора, реостата для регулировки тока накала нити лампы и измерительного прибора, проградуированного в градусах Цельсия яркостной температуры.

Выполнение работы

Упражнение 1. Определение постоянной Стефана-Больцмана

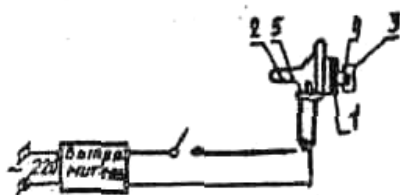
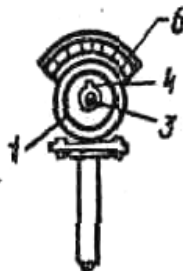


Рис.2.



правильно



неправильно



неправильно

Рис.3.

1. Установите белую отметку на повторном кольце реостата 1 (рис. 2) против такой же отметки на корпусе прибора. При этом стрелка прибора при включённой сети питания должна быть на нулевой отметке шкалы.
2. Проверьте, выведен ли ослабляющий (дымчатый) светофильтр: белая точка на головке 5 должна быть повернута на четверть оборота от индекса 20.
3. Совместите дугообразную нить окуляра пирометра с вольфрамовой нитью лампы накаливания.
4. Поворотом головки 4 введите в поле зрения красный светофильтр.
5. Поворотом кольца реостата 1 *добейтесь равенства видимых яркостей, наблюдаемых через светофильтр, среднего участка дугообразной нити пирометра и фона раскалённой вольфрамовой нити* (рис. 3), и отсчитайте яркостную температуру по верхней шкале пирометра 6 (рис. 2). Если температура вольфрамовой нити окажется больше 1400 °С, то введите ослабляющий светофильтр и совместите белую точку на головке 5 с индексом «20». Температуру в этом случае отсчитывайте по нижней шкале пирометра.

6. Операцию, описанную в пункте 5, повторите несколько раз при различных величинах тока и напряжения в цепи вольфрамовой нити.

7. Определите истинную температуру T по графику, построенному по таблице 1.

8. Рассчитайте для каждого значения температуры мощность излучения с поверхности вольфрамовой нити лампы

накаливания по формуле $P = \frac{I \cdot U}{S}$, где S - поверхность исследуемой нити, которая указана на установке.

Постоянную Стефана – Больцмана рассчитайте по формуле:

$$\sigma = \frac{IU}{a_T S T^4} \quad (11)$$

Определяют её для каждого измерения. Значение a_T для вольфрамовой нити возьмите из таблицы 1.

9. Ответ запишите в виде

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm t_{p,k} S_{\langle \sigma \rangle}.$$

Обработку проведите по методике прямых измерений (см. лабораторную работу № 0-1).

9. Определите относительную погрешность измерения постоянной Стефана – Больцмана σ

$$\varepsilon = \left| \frac{\sigma_{теория} - \sigma_{практика}}{\sigma_{теория}} \right| \cdot 100 \%,$$

где $\sigma_{теория} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$.

10. Сделайте соответствующий вывод.

Упражнение 2. Вычисление постоянной Планка

1. По полученным значениям постоянной Стефана – Больцмана, используя формулу (8), рассчитайте соответствующие значения постоянной Планка:

$$h_i = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma_i}}$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ - скорость света в вакууме, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - постоянная Больцмана.

2. Ответ запишите в виде

$$h = \langle h \rangle \pm t_{p,k} S_{\langle h \rangle}.$$

Обработку результатов проведите по методике прямых измерений (см. лабораторную работу № 0-1).

3. Определите относительную погрешность измерения постоянной Планка

$$\varepsilon = \left| \frac{h_{теория} - h_{практика}}{h_{теория}} \right| \cdot 100 \%,$$

где $h_{теория} = 6.62 \cdot 10^{-34} Дж \cdot с$.

4. Сделайте соответствующий вывод.

Таблица 1

Характеристика излучения вольфрама

T	$T_{яр.}$	α 0,66	α 0,467	a_T
1000	966	0,456	0,483	0,105
1200	1149	0,452	0,478	0,141
1400	1330	0,448	0,475	0,175
1600	1508	0,443	0,471	0,207
1800	1624	0,439	0,469	0,237
2000	1857	0,435	0,466	0,263
2100	1943	0,433	0,465	0,274
2220	2107	0,431	0,463	0,285

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение? Дайте определения основным характеристикам теплового излучения.
2. Как связаны между собой энергетическая светимость и спектральная лучеиспускательная способность тела?
3. Что такое абсолютно чёрное тело? Какие тела можно рассматривать как абсолютно чёрные?
4. Модель абсолютно чёрного тела. Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела. Их основные закономерности.
5. Что такое серое и реальное тело?
6. Сформулируйте основные законы теплового излучения.
7. В чём заключается гипотеза Планка для теплового излучения?

Краткие теоретические сведения

Тепловым называется электромагнитное излучение, которое обусловлено тепловым движением атомов и молекул вещества (то есть его внутренней энергией) и зависит только от температуры и оптических свойств этого вещества.

Тепловое излучение связано с потерей телом энергии. Причём с ростом температуры возрастает и энергия, излучаемая телом электромагнитными волнами разных длин волн λ .

Тепловое излучение испускают все тела, температура которых выше нуля градусов по Кельвину. Чем выше температура, тем интенсивнее излучение.

Тепловое излучение является единственным видом излучения, которое может быть равновесным. В состоянии лучистого равновесия вся энергия, поглощённая телом за какой-либо промежуток времени Δt , теряется им вследствие излучения за этот же промежуток времени Δt , поэтому температура тела не изменяется.

Характеристики теплового излучения

1. **Энергетическая светимость** R_T , которая показывает энергию W , излучаемую за единицу времени с единицы площади поверхности S источника во всём интервале длин волн λ , и определяется формулой:

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

$$R_T = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

2. **Спектральная плотность энергетической светимости** $r_{\lambda,T}$ – (функция распределения энергии излучения по спектру), которая показывает энергию, излучаемую за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ (или частот), и определяется формулой:

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

$$[r_{\lambda,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \quad \text{или} \quad [r_{\nu,T}] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$$

Параметры R_T и $r_{\lambda,T}$ связаны между собой соотношением:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad (3)$$

Коэффициент поглощения $a_{\nu,T}$ (или спектральная поглощательная способность тела) - безразмерная величина, показывающая, какая часть падающей на тело энергии $W_{\text{падающая}}$ (в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$) им

поглощается $W_{\text{поглощённая}}$:

$$a_{\nu,T} = \frac{W_{\text{поглощённая}}}{W_{\text{падающая}}}, \quad (4)$$

По тепловому излучению различают **абсолютно чёрное, серое и реальное тела**.

Абсолютно чёрным телом называется тело, которое при любой температуре полностью поглощает всё падающее на него тепловое излучение.

Для абсолютно чёрного тела коэффициент поглощения равен единице при любой температуре и частоте, то есть $a_{\nu,T} = 1$.

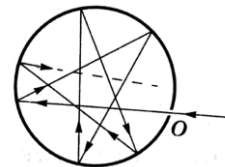
Понятие абсолютно чёрного тела не связано с так называемым «чёрным цветом», так как абсолютно чёрным может быть и тело белого каления, если только его поглощательная способность равна единице (Солнце – почти абсолютно чёрное тело, так как любое тепловое излучение падающее на него из космоса поглощается Солнцем).

Серым телом называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы, но одинаков для всех частот при одной и той же температуре, то есть $a_{\nu,T} < 1$.

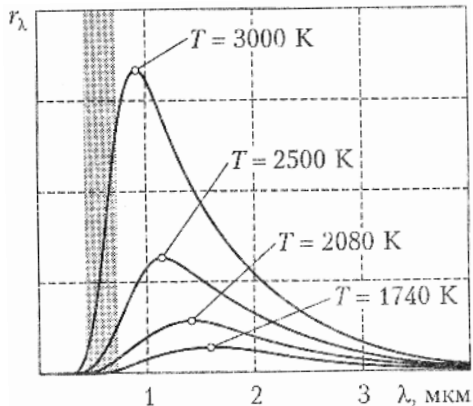
(коэффициент поглощения $a_{\nu, T}$ всех реальных тел меньше единицы, зависит от частоты и температуры тела. Реальные тела можно рассматривать как серое тело лишь в определённых интервалах частот $\Delta\nu$, где коэффициент поглощения $a_{\nu, T}$ при данной температуре приблизительно одинаков)

Модель абсолютно чёрного тела

Идеальной моделью абсолютно чёрного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием О, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч света, попавший вовнутрь такой полости, после нескольких отражений полностью поглощается стенками полости.



Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела



Кривые теплового излучения
абсолютно чёрного тела

Наблюдения показывают что:

1. Тепловое излучение абсолютно чёрного тела имеет сплошной спектр и его интенсивность зависит от температуры тела.
2. С увеличением температуры тела максимум интенсивности теплового излучения смещается в сторону более коротких длин волн.
3. С увеличением температуры тела резко возрастает максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости.

Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа для теплового излучения

Отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела $r_{\nu, T}$ к его коэффициенту поглощения $a_{\nu, T}$ не зависит от вещества тела и равна спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r_{\nu, T}^{АЧТ}$, являющейся функцией только частоты и температуры.

$$\frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} = r_{\nu, T}^{АЧТ}$$

Закон Стефана – Больцмана для абсолютно чёрного тела

Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры:

$$R_T = \sigma T^4, \text{ где } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} - \text{постоянная Стефана-Больцмана}$$

Закон смещения Вина

Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, \text{ где } b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} - \text{постоянная Вина}$$

Второй закон Вина

Величина максимальной спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела прямопропорциональна пятой степени его абсолютной температуры:

$$r_{\lambda, T}^{\text{max}} = CT^5, \text{ где } C = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5} - \text{постоянная Вина}$$

Гипотеза Макса Планка о тепловом излучении (1900 г)

Планк предложил следующую гипотезу: атомы вещества излучают электромагнитную энергию не непрерывно, как предполагали Вин и Релей, а порциями, то есть квантами с энергией $E_\phi = h\nu$.

(На основании своей гипотезы он вывел уравнение, которое хорошо описывает все закономерности теплового излучения и как следствие содержит в себе все основные законы теплового излучения абсолютно чёрного тела)

Закон Планка для теплового излучения абсолютно чёрного тела

Основываясь на гипотезе о квантовой теории излучения, Планк методом статической физики нашёл аналитическое выражение функции распределения теплового излучения по длинам волн и частотам в спектре абсолютно черного тела для каждой заданной температуры:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{kT} - 1} \quad \text{или} \quad r_{\nu,T} = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}, \quad (5)$$

где h – постоянная Планка; $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость света в вакууме;

Из формулы Планка (5) вытекают как частные случаи экспериментально установленные ранее законы теплового излучения абсолютно чёрного тела – законы Стефана – Больцмана и Вина.

Действительно, интегрируя соотношение (5) по всему интервалу длин волн, получают закон Стефана – Больцмана:

$$R_T = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4, \quad (6)$$

или

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

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, которая была определена опытным путём.

Из формул (6) и (7) следует что:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}. \quad (8)$$

К серым телам закон Стефана – Больцмана строго не может быть применён, т.к. наблюдения показывают, что для таких тел с изменением температуры изменяется как σ , так и показатель степени.

Полное излучение серых тел определяется из соотношения:

$$R_T = a_T \sigma T^4. \quad (9)$$

Здесь a_T – **коэффициент (или степень) черноты** данного тела, зависящий от его природы, состояния поверхности и температуры.

Тепловое излучение широко используется для исследования свойств и температуры излучающего вещества. Оптические методы определения температуры тела основаны на изменении энергетической светимости R_T или спектральной способности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ в зависимости от температуры.

Методы изменения температуры тела по его тепловому излучению называются **оптической пирометрией**. Они особенно удобны при измерении высоких температур. Один из таких методов – **яркостной метод измерения температуры**. Он основан на визуальном сравнении яркости эталона – раскалённой нити лампы пирометра с яркостью изображения накалённого испытуемого тела. *Равенство видимых яркостей, наблюдаемых через светофильтр, фиксируется по исчезновению изображения нити на фоне раскаленного тела.*

Предварительной градуировкой при наблюдении абсолютно чёрного тела устанавливается соотношение между температурой и силой тока, текущего через нить накала в момент совпадения яркостей нити и абсолютно чёрного тела.

Если тело, температуру которого определяют, излучает как абсолютно чёрное, то найденная с помощью пирометра температура является его истинной температурой. Если же тело серое, то измеренная пирометром температура его нуждается в поправке. Действительно, пользуясь пирометром, определяют температуру тела, при которой его яркость для определённой длины волны равна яркости чёрного тела для той же длины волны. Но, поскольку, это тело излучает во всём спектре не как черное, то нет основания считать найденную температуру его истинной температурой. Находят температуру такого абсолютно черного тела, которое имеет в наблюдаемом участке спектра $\Delta\lambda$ яркость, одинаковую с яркостью исследуемого тела. Это температура носит название **яркостной температуры** $T_{яр}$. Яркостная температура тела всегда ниже его истинной термодинамической температуры. Это связано с тем, что любое серое тело излучает меньше, чем абсолютно чёрное тело при той же температуре.