Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» в г. Белово

Кафедра горного дела и техносферной безопасности

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА

Методические указания по выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Физика»

для студентов направлений 21.05.04 «Горное дело»,

20.03.01 «Техносферная безопасность»

Составитель: С.В. Белов

Утверждены на заседании кафедры

Протокол № 5 от 15.01.2020 г.

Рекомендованы к печати

методическим советом филиала

КузГТУ в г. Белово

Протокол № 6 от 22.01.2020 г.

Электронная копия находится в методическом кабинете филиала КузГТУ в г. Белово

### 

*Белово 2020*

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА

### **1. Цель работы**: 1) ознакомление с принципом действия яркостного пирометра и практическое измерение яркостной температуры нагретого тела;

2) применение закона Кирхгофа и формулы Планка для определения истинной температуры тела;

3) экспериментальная проверка справедливости закона Стефана-Больцмана.

**2. Подготовка к работе:** ознакомиться с описанием лабораторной работы, изучить в [1] Глава 1, [2] § 35.1–35.3 , [3] §§ 197–201.

Для выполнения работы студент должен знать:

а) особенности теплового излучения и его отличия от других видов излучения;

б) физические понятия: спектральная плотность энергетической светимости, энергетическая светимость, спектральный коэффициент излучения, степень черноты;

в) законы теплового излучения: закон Кирхгофа, закон Стефана – Больцмана, закон смещения Вина, закон Вина и их физический смысл;

г) метод измерения яркостной температуры с помощью оптического (яркостного) пирометра;

д) методику обработки экспериментальных данных.

# 3. Выполнение работы

**3.1. Описание лабораторной установки**

Объектом исследования в данной работе является раскаленная нить *1* лампы *Л* (рис. 1). Лампа помещена в защитный кожух *2*, в котором имеется прямоугольное окно *3*. Проходя через это окно, излучаемый лампой свет попадает на объектив *4* *яркостного пирометра П* – специального прибора для бесконтактного (осуществляемого на расстоянии) измерения высоких температур.

|  |
| --- |
| Схема_53 |
| *Рис.1. Схема экспериментальной установки: Л – исследуемая лампа;*  *П – пирометр; Б – батарея питания.1 – нить накала лампы Л; 2 – защитный кожух; 3 – окно;4 – объектив; 5 – окуляр; 6 – кольцо потенциометра;7 – шкала; 8 – ввод/вывод нейтрального светофильтра* |

Схема питания лампы *Л* от выпрямителя *В* изображена на рис. 2 (а).

|  |
| --- |
| а)Рис_36 б) |
| *Рис.2. Схема питания лампы Л (а) и эталонной лампы (б)* |

Подаваемое на лампу напряжение регулируется с помощью потенциометра *Р*1 и измеряется вольтметром *V*1; для измерения силы тока, протекающего по нити накала *1*, служит амперметр *А*.

Основной частью пирометра *П* является вмонтированная внутри прибора пирометрическая эталонная лампа *Э*. Эталонная лампа питается от внешней аккумуляторной батареи *Б* по схеме, изображенной на рис. 2 (б). Цепь замыкается тумблером *К*, расположенным у основания пирометра. Потенциометр *Р*2 служит для регулирования подаваемого на лампу *Э* напряжения; на практике это осуществляется вращением кольца *6* на корпусе прибора. Температура нити накала эталонной лампы однозначно связана с подаваемым на нее напряжением; поэтому шкала *7* измеряющего его вольтметра *V*2 проградуирована в градусах Цельсия.

Попадающий на объектив *4* свет от исследуемой лампы *Л* проходит через систему линз оптической трубы пирометра (рис. 3), позволяющую наблюдать в окуляр *5* совмещенные в одной плоскости изображения нитей накала исследуемой (*Л*) и эталонной (*Э*) ламп.

|  |
| --- |
|  |
| *Рис. 3. Система линз оптической трубы пирометра* |

Расположенный в оптической трубе красный светофильтр *КФ* пропускает в окуляр практически монохроматический свет с длиной волны *λ* = 660 *нм*; поэтому изображения нитей имеют красную окраску.

|  |
| --- |
| Рис_39 |
| *Рис. 4 Наблюдаемая в окуляр картина в случаях, когда яркость нити Э меньше (а), больше (б) и равна (в) яркости нити Л.* |

Изменяя напряжение, подаваемое на эталонную лампу, можно добиться одинаковой яркости обеих нитей. Рис. 4 показывает наблюдаемую в окуляр картину в случаях, когда яркость нити *Э* меньше (*а*), больше (*б*) и равна (*в*) яркости нити *Л*. В последнем случае эталонная нить становится незаметной на фоне исследуемой (поэтому приборы такого типа называют пирометрами с исчезающей нитью).

При высокой температуре лампы *Л* предусмотрено введение нейтрального светофильтра *НФ* с помощью рычажка *8* на корпусе пирометра. Нейтральный светофильтр уменьшает яркость изображения нити *Л* и позволяет уравнять яркости наблюдаемых в окуляр нитей при меньшем напряжении на лампе *Э*. При введенном светофильтре *НФ* показания пирометра снимаются с его нижней шкалы, а при выведенном (низкие температуры) – с верхней.

**3.2. Методика измерений и расчёта**

В отсутствие красного светофильтра *КФ* яркость изображения нити прямо пропорциональна ее излучательности (энергетической светимости) *R*, т.е. энергии, излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела (нити) во всем диапазоне длин волн. Через светофильтр *КФ* проходит лишь часть этой энергии Δ*Rλ*, соответствующая интервалу длин волн от *λ* до *λ* + Δ*λ*. Для достаточно узкого интервала Δ*λ* можно положить

 (1)

где  – спектральная плотность излучательности (испускательная способность) тела; *Т* – его абсолютная температура.

Проблема градуировки пирометра заключается в том, что различные тела имеют разные значения спектральной плотности излучательности при одних и тех же длине волны и температуре. Открытые экспериментально и обоснованные теоретически законы описывают тепловое излучение *абсолютно черного тела* (*АЧТ*). Поэтому проградуированная соответствующим образом шкала пирометра показывает не истинную температуру *Т* нити эталонной лампы *Э*, а так называемую *яркостную температуру Тя*, т.е. температуру *АЧТ*, имеющего такую же яркость. При выравнивании яркостей нитей *Л* и *Э* значения Δ*Rλ* у них становятся одинаковыми. Учитывая (1), можем записать

 (2)

где  – спектральная плотность излучательности абсолютно черного тела при температуре *Тя*.

Как следует из *закона Кирхгофа*, спектральные плотности излучательности реального тела *r*(*λ*,*Т*) и *АЧТ* *r*0(*λ*,*Т*) связаны соотношением

 (3)

где *α*(*λ*,*Т*) – коэффициент поглощения (степень черноты) тела. У многих тел, в частности, у вольфрама, из которого изготовлена нить лампы *Л*, коэффициент поглощения не очень сильно зависит от температуры (см. справочные данные в приложении). Поэтому можно с достаточной степенью точности использовать для заданной длины волны *λ* осредненное в данном температурном диапазоне значение *αλ*. Тогда последнее соотношение примет вид

 (4)

Приравнивая друг другу правые части выражений (2) и (4), получим:

 (5)

Зависимость спектральной плотности излучательности *АЧТ* от длины волны и температуры (универсальная *функция Кирхгофа*) *r*0(*λ*,*T*) описывается *формулой Планка*



где *h* – постоянная Планка; *с* – скорость света в вакууме; *k* – постоянная Больцмана. При сравнительно низких температурах (*T <*6000 *К*) единицей в квадратных скобках можно пренебречь, и формула Планка примет вид



Подставляя последнее выражение в (5), получим:



или, после логарифмирования:

 (6)

Уравнение (6) связывает истинную температуру *Т* излучающего тела с его яркостной температурой *Тя*. Решая его относительно *Т*, находим:

 , (7)

где

 . (8)

Как известно, тепловое излучение тел имеет место при любой отличной от абсолютного нуля температуре. Поэтому отключенная от источника питания нить лампы *Л* излучает энергетический поток

 (9)

где *S* – площадь поверхности нити; *R*(*T*0) – ее излучательность при комнатной температуре *Т*0. После подключения лампы к сети питания ее нить разогревается за счет джоулева тепла до температуры *Т* и излучает энергетический поток

 (10)

превышающий Φ0 на величину потребляемой лампой мощности:

 (11)

где *η* – *кпд*  питающей цепи, учитывающий различные энергопотери. Мощность *Р* легко рассчитать как

 , (12)

где *U* – питающее напряжение; *I* – сила тока в цепи.

С учетом (9) и (10) уравнение (11) можно переписать в виде

 (13)

Излучательность *R*(*T*) определяется из интегрального соотношения



или, с учетом (3):



Считая нить лампы *Л* *серым телом*, т.е. пренебрегая зависимостью ее коэффициента поглощения от длины волны и заменив функцию *α*(*λ*,*Т*) ее осредненным во всем диапазоне длин волн значением *αТ*, получим:



где *R*0(*T*) – излучательность абсолютно черного тела. Согласно *закону Стефана-Больцмана* зависимость *R*0(*T*) имеет вид



где *σ* – постоянная Стефана-Больцмана.

С учетом принятых допущений выражение (13) примет вид

 (14)

Значения коэффициента поглощения  (при температуре *Т*0) и *αТ* (при температуре *Т*) составляют десятые доли единицы, т.е. являются величинами одного порядка, в то время как абсолютная температура раскаленной нити в четыре-пять раз превышает комнатную температуру *Т*0. Таким образом, *Т*04 << *Т*4 и вычитаемым в левой части уравнения (14) можно пренебречь. Перепишем это уравнение в виде

 (15)

где .

Логарифмируя уравнение (15) и выражая из него величину ln*T*, получим

 (16)

где *С*2 = 0,25ln*С*1.

Из соотношения (16) следует, что график зависимости ln*T* от ln*P* должен иметь характер, близкий к линейному с угловым коэффициентом, примерно равным 0,25.

**3.3. Порядок выполнения работы**

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой и измерительными приборами. Определите цену деления вольтметра *V*1 и амперметра *А* в цепи питания лампы *Л*; научитесь снимать показания этих приборов.

2. Вращая по часовой стрелке кольцо *6* потенциометра *Р*2 на корпусе пирометра, увеличивайте подаваемое на эталонную лампу *Э* напряжение до тех пор, пока в окуляр не будет видна нить этой лампы (имеющая форму дуги). Если это изображение наблюдается не в красном свете, то введите красный светофильтр *КФ*, повернув по часовой стрелке накатанное кольцо на оправе окуляра.

3. Ознакомьтесь с верхней и нижней шкалами пирометра и научитесь снимать их показания.

4. Запишите в таблицу рекомендуемые значения напряжения *U*. Действуя потенциометром *Р*1 и наблюдая за показаниями вольтметра, установите наименьшее из этих значений.

*Таблица*

*Результаты измерения температуры нити накала лампы*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер опыта | *U,*  *B* | *I,*  *A* | *P,*  *Вт* | ln*P* | *t,*  °*C* | *Тя,*  *К* | *Т,*  *К* | ln*T* |
| 1 |  |  |  |  | *t*1 = |  |  |  |
| *t*2 = |
| *t*3 = |
| *t* = |
| 2 |  |  |  |  | *t*1 = |  |  |  |
| … |
| 6 |  |  |  |  | *t*1 = |  |  |  |
| *t*2 = |
| *t*3 = |
| *t* = |

5. Посмотрите в окуляр пирометра и убедитесь в том, что нить лампы *Л* видна в поле зрения.

6. Снимите показания амперметра *А* и запишите значение силы тока в таблицу.

7. Наблюдая в окуляр пирометра изображения обеих нитей и вращая кольцо *6* потенциометра *Р*2, добейтесь их одинаковой яркости (см. рис. 4). По шкале пирометра определите яркостную температуру нити и занесите ее значение (в °*С*) в таблицу.

8. Не глядя в окуляр, поверните кольцо *6* против часовой стрелки, тем самым сбив настройку пирометра.

9. Повторите пп. 7 и 8 еще дважды. Рассчитайте и занесите в таблицу среднее из трех значений температуры *t*. Переведите это значение из °*С* в кельвины и заполните следующий столбец таблицы (*Тя*).

10. Увеличивая напряжение *U* на лампе *Л* согласно рекомедациям, выполните пп. 6-9 еще пять раз. Когда показания пирометра будут близки к концу его верхней шкалы, поворотом рычажка *8* по часовой стрелке на 90° введите нейтральный светофильтр *НФ*; после этого считывайте показания с нижней шкалы.

11. Для каждого из проделанных опытов рассчитайте по формуле (12) мощность *Р* и величину ln*P*; занесите найденные значения в соответствующие столбцы таблицы.

12. Используя справочные данные о коэффициенте поглощения вольфрама (см. приложение), оцените его среднее в исследованном температурном диапазоне значение *αλ* при длине волны *λ* = 660 *нм*. Выразив величину *λ* в метрах, по формуле (8) вычислите константу *С* (в *К*–1) и запишите ее в тетрадь.

13. Для каждого опыта рассчитайте по формуле (7) истинную температуру *Т* нити накала лампы *Л*, а также величину ln*Т*. Заполните соответствующие столбцы таблицы.

14. Нанесите экспериментальные точки на график зависимости ln*T* от ln*P*; проведите по ним сглаживающую прямую. Оцените (с учетом масштаба!) угловой коэффициент этой прямой. Сделайте вывод о применимости закона Стефана-Больцмана для данного объекта исследования.

**4. Контрольные вопросы**

1. Какое излучение называется тепловым? Чем оно отличается от других видов, например, люминесцентного излучения?

2. Что называется объемной плотностью энергии? Спектральной плотностью потока излучения? Энергетической светимостью? Спектральной плотностью энергетической светимости?

3. Что определяет коэффициент поглощения? Дайте характеристику черного, серого и цветного тела?

4. В чем заключается правило Прево и закон Кирхгофа?

5. Для каких тел справедливы законы Стефана – Больцмана, закон смещения Вина, закон Вина? Сформулируйте эти законы.

6. Каким образом можно графически проиллюстрировать закона смещения Вина с помощью зависимостей rλ,T = rλ,T(λ) и rν,T = rν,T(ν)?

7. Что такое яркостная температура? Как связаны истинная Т и яркостная Тя температуры нагретых тел?

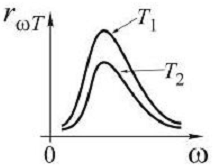
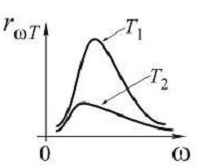
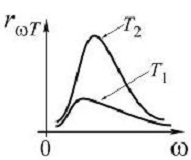
8. На каком физическом принципе основано действие оптического пирометра?

**5. Тестовые задания**

**Тест 1**

Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела в зависимости от частоты излучения для температур Т1 и Т2 (Т1> Т2) верно представлено на рисунке…

**Варианты ответов:**

1)2) 3) 

**Тест 2**

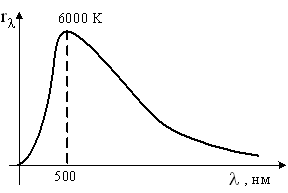
Если температуру абсолютно черного тела уменьшить в 2 раза, то его энергетическая светимость уменьшится …

**Варианты ответов:**

1) в 4 раза; 2) в 2 раза; 3) в 16 раз; 4) в 8 раз

**Тест 3**

На рисунке представлено распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела в зависимости от длины волны для температуры T=6000 К. При увеличении температуры в 2 раза длина волны (в нм), соответствующая максимуму излучения, будет равна …



**Варианты ответов:**

1) 250

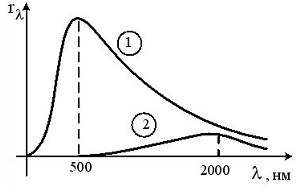
2) 1000

3) 125

4) 750

**Тест 4**

На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плоскости энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 2 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1450 К, то кривая 1 соответствует температуре (в К )…



**Варианты ответов:**

1) 2900;

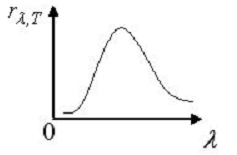
2) 1933;

3) 725;

4) 5800

**Тест 5**

На рисунке изображен спектр излучения абсолютно черного тела при температуре T. При температуре Т1 площадь под кривой увеличилась в 81 раз. Температура Т1 равна…



**Варианты ответов:**

1)  ;

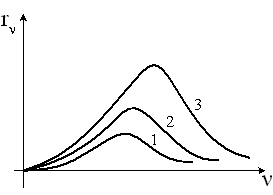
2) 3Т;

3) ;

4) 9Т

**Тест 6**

На рисунке представлены графики зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от частоты при различных температурах. Наименьшей температуре соответствует график…



Варианты ответов:

1) 1

2) 2

3) 3

**6. Список рекомендуемой литературы**

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 томах/ И.В. Савельев. — 13-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, [б.г.]. — Том 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2019. — 320 с.

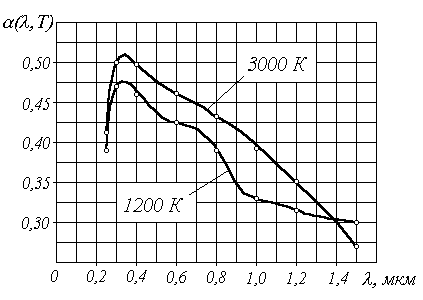
URL: https://e.lanbook.com/book/123463

2. Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., стереотип. – М.: Издат. центр «Академия», 2007. – 720 с.

3. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов. – Изд. 18-е, испр. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 560 с.

**Приложение**

### **Коэффициент поглощения (степень черноты) вольфрама α**

**

## **Некоторые константы и часто применяемые величины**

Постоянная Больцмана *k* = 1,38⋅10 – 23 *Дж/К*

Постоянная Авогадро *NA* = 6,02⋅10 26 *кмоль* – 1

Элементарный электрический заряд *е* = 1,6⋅10 – 19 *Кл*

Диэлектрическая постоянная *ε*0 = 8,85⋅10 – 12 *Ф/м*

Магнитная постоянная *μ*0 = 4*π*⋅10 – 7 *Гн/м*

Постоянная Планка *h* = 6,62⋅10 – 34 *Дж*⋅*с*

Ускорение свободного падения *g* = 9,8 *м/с*2

Универсальная газовая постоянная *R* = 8,31 *кДж/(кмоль⋅К)*

Скорость света в вакууме *с* = 3⋅10 8 *м/с*

Постоянная Стефана-Больцмана *σ* = 5,67⋅10 – 8 *Вт/(м*2⋅*К*4*)*

Постоянные Вина: *b* = 2,90⋅10 – 3 *К*⋅*м*; *С* = 1,29⋅10 – 5 *Вт/(м*3⋅*К*5*)*

Постоянная Ридберга *R* = 1,10⋅10 7 *м*– 1

Коэффициент пропорциональности между массой и энергией

*с*2 = 9⋅10 16 *Дж/кг =*931,4 *МэВ/а.е.м*

Составитель

Белов Сергей Викторович

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА

Методические указания по выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Физика»

для студентов направлений 21.05.04 «Горное дело»,

20.03.01 «Техносферная безопасность»

Отпечатано на ризографе.

Тираж экз.

Филиал ГУ КузГТУ в г. Белово. 652644, г. Белово, ул. Ильича 32-а