

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения
Экспериментальной физики ТПУ

_____ А. М. Лидер

« __ » _____ 2023 г.

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы О-14
по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и специаль-
ностей

Составители: Л.Н. Никитина

Издательство
Томского политехнического университета
2023

УДК 53.01

Изучение законов теплового излучения: Методические указания к выполнению лабораторной работы О-14/ Л.Н. Никитина, – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 8 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром Отделения Экспериментальной Физики.

« ____ » _____ 2023 г.

Председатель учебно-методической комиссии _____ А. М. Лидер

Рецензент
Кравченко Надежда Степановна

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: исследование зависимости энергетической светимости термостолбика от температуры. Определение постоянной Стефана-Больцмана

Оборудование: стенд, включающий в себя блок управления, печь и термостолбик

Введение

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела, называется тепловым излучением.

Тепловое излучение, самое распространенное в природе, происходит за счет теплового движения атомов и молекул и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. Если энергия, расходуемая телом на тепловое излучение, не восполняется за счет соответствующего количества теплоты, подводимого к телу, то его температура постепенно понижается, а тепловое излучение уменьшается.

Тепловое излучение – единственное излучение, способное находиться в термодинамическом равновесии с веществом. В теплоизолированной (адиабатически изолированной) системе температура тела остается постоянной. Т.е. в состоянии термодинамического равновесия энергия, расходуемая каждым из тел системы на тепловое излучение, компенсируется таким же количеством поглощенной энергии падающего на тело излучения.

Энергетические характеристики теплового излучения

Интегральные характеристики используют при учете полной энергии излучения во всем диапазоне длин волн (частот), испускаемых телом.

Потоком излучения Φ называют энергию, излучаемую телом за единицу времени во всех направлениях, т.е. мощность излучения тела.

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

Энергетическая светимость R_T – это поток излучения с единицы площади поверхности тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π во всем диапазоне длин волн (частот). Энергетическая светимость является функцией температуры T

$$R_T = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2)$$

Размерность $[R_T]=\text{Дж}/\text{м}^2\text{с}=\text{Вт}/\text{м}^2$.

2. Спектральные характеристики теплового излучения

Измерения показывают, что энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускают нагретые тела. Энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности тела в единичном интервале длин волн, называется спектральной плотностью энергетической светимости

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,\lambda+d\lambda}}{dS dt d\lambda} \quad (3)$$

Из определения вытекает связь между спектральной плотностью энергетической светимости и энергетической светимостью

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda \quad (4)$$

Величина, равная отношению энергии поглощенного света к энергии падающего, называется **коэффициентом поглощения** или поглощательной способностью тела:

$$\alpha = \frac{W_{\lambda\text{погл}}}{W_{\lambda\text{пад}}} \quad (5)$$

Для монохроматического потока спектральная поглощательная способность – отношение поглощенного потока к величине падающего потока

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{d\Phi_{\lambda,T}^{\text{погл}}}{d\Phi_{\lambda,T}^{\text{пад}}} \quad (6)$$

Тело, у которого $\alpha_{\lambda,T} = 1$ для всех длин волн, называется абсолютно черным. Абсолютно черное тело (АЧТ) полностью поглощает все падающее на него излучение любой длины волны при любой температуре. Коэффициент поглощения АЧТ для всех длин волн при любых температурах равен единице, а коэффициент отражения равен нулю.

В природе не существует тел, совпадающих по свойствам с абсолютно черным телом. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью, приближаются по своим свойствам к абсолютно черным в ограниченном интервале длин волн. Реальные тела, называемые черными, хорошо поглощают только излучения видимой области спектра.

Тем не менее, можно указать на тело, которое по своим свойствам практически не будет отличаться от абсолютно черного тела – это очень малое отверстие в некоторой полости. Луч любой длины волны, попавший внутрь такой полости, может выйти из нее только после многократных отражений. При каждом отражении от стенок полости часть энергии луча поглощается и лишь ничтожная доля энергии лучей, попавших в отверстие, сможет выйти обратно. Поэтому коэффициент поглощения отверстия оказывается весьма близким к единице. Такая модель АЧТ может быть нагрета до высоких температур. Тогда из отверстия в полости выходит интенсивное излучение, и отверстие будет ярко светиться (при этом оно остается абсолютно поглощающим).

Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела, оно является универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры $r_{\lambda,T}$ – универсальная функция Кирхгофа:

$$r_{\lambda,T} = \frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \quad (7)$$

Для АЧТ $\alpha_{\lambda,T} = 1$ и $r_{\lambda,T} = R_{\lambda,T}$. Следовательно, универсальная функция Кирхгофа есть спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Закон излучения Планка. Основываясь на гипотезе о квантовой природе излучения, Планк показал, что

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (8)$$

h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света.

При постоянной температуре зависимость (8) описывает распределение энергии излучения АЧТ по длинам волн (частотам) (см. рис. 1).

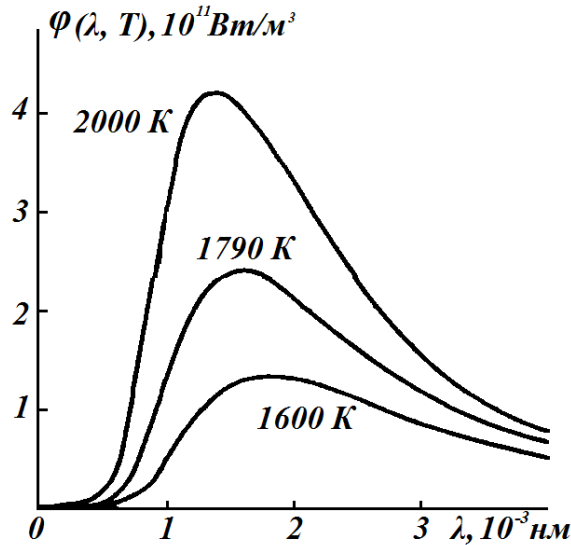


Рис. 1 Испускательная способность АЧТ

Закон смещения Вина. Как видно из рис. 1, основная энергия излучается в довольно узком интервале длин волн, от положения которого на оси зависит цвет нагретого тела.

Для получения закона смещения Вина необходимо исследовать (8) на

максимум. Взяв производную $\frac{dr_{\lambda,T}}{d\lambda}$ и приравняв ее к нулю, получим

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (9)$$

где $b = \frac{hc}{4.965k} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина.

Длина волны, соответствующая максимальному значению испускательной способности АЧТ обратно пропорциональна термодинамической температуре.

Закон Стефана-Больцмана.

На основании (4) энергетическую светимость АЧТ можно получить интегрированием функции Планка по всему интервалу длин волн:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$$

или

$$R = \sigma T^4 \quad (10)$$

Итак, полная энергия, излучаемая абсолютно черным телом за 1 с, пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана-Больцмана), $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м²·с·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Тогда мощность излучения можно определить как

$$W = \sigma T^4 S \quad (11)$$

Из закона Стефана-Больцмана следует, что количество теплоты, передаваемое единицей поверхности АЧТ, нагретого до температуры T_1 , в окружающую среду с температурой T_2 равно

$$R = R_1 - R_2 = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (12)$$

Если тело не черное, то

$$R = \alpha_T \sigma T^4 \quad (13)$$

Где α – коэффициент серости, который показывает, во сколько раз серое тело излучает энергии меньше, чем АЧТ при той же температуре.

Метод измерений

Из уравнения (11) следует, что мощность излучения прямо пропорциональна четвертой степени температуры, тогда постоянная Стефана-Больцмана может быть определена из графика зависимости $W=W(T^4)$ как

$$\sigma = \frac{tg \alpha}{S}, \quad tg \alpha = \frac{\Delta W}{\Delta T^4} \quad (15)$$

Площадь излучателя $S=(\pi \cdot 0.6^2) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2=1.13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Описание установки

Установка выполнена в виде блока (1), на который установлены печь (2) и термостолбик (3). Во время работы печь (полый цилиндр) нагревается до температуры 250 °С, излучение из цилиндра выходит через отверстие в тепловом экране и попадает в окно приемника излучения (термостолбика). Печь выполняет роль абсолютно черного тела. Текущая температура образца и термо-ЭДС термостолбика отображаются автоматически на цифровых индикаторах блока управления, находящегося на лицевой панели.

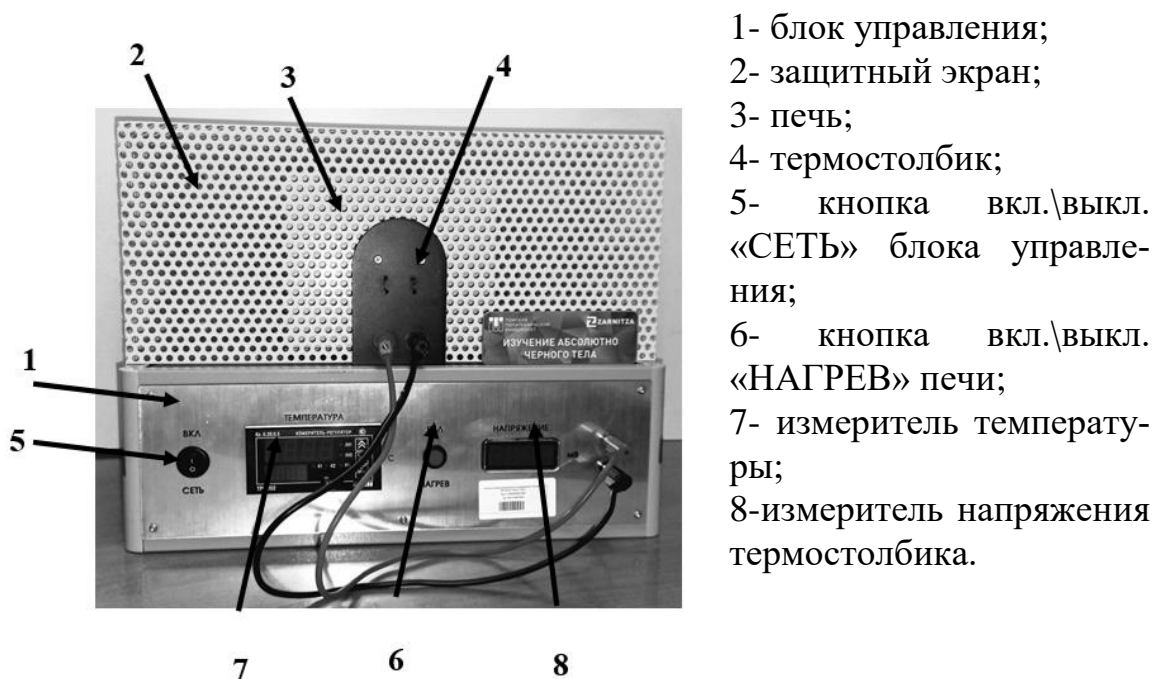


Рис.2 Установка

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что термостолбик установлен так, чтобы втулка на передней панели совпадала с отверстием на передней панели печи.
2. Подключить блок управления к сети переменного тока 220 В 50 Гц с помощью сетевого шнура.
3. Подключить термостолбик к измерительным клеммам «Вх» лицевой панели блока управления.
4. Включить блок управления, переведя выключатель питания «СЕТЬ» в положение «ВКЛ».
5. Включить печь, нажав на кнопку «ВКЛ» выключателя «НАГРЕВ».
6. С шагом, заданным преподавателем, записать показания температуры и значения ЭДС термостолбика от 100⁰С до 200⁰С.

Таблица 1

Экспериментальные результаты

$t, ^\circ\text{C}$	$T \cdot 10^3, \text{K}$	$\ln T$	$T^4 \cdot 10^{12}, \text{K}^4$	U, mV	$W, \text{Вт}$	$\ln W$

7. По завершению эксперимента отключить питание блока управления перевести выключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ», отключить шнур от сети переменного тока 220 В 50 Гц.

8. Мощность излучения W определите из графика зависимости $W(U)$, представленном на рисунке 3.

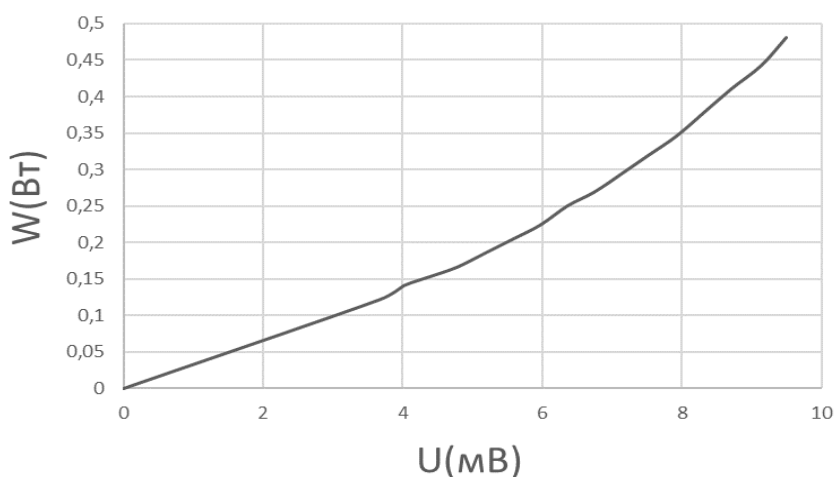


Рис.3 Зависимость мощности излучения W от показаний ЭДС термостолбика U

9. Постройте график зависимости $W = f(T^4)$.
10. Рассчитайте тангенс угла наклона этой зависимости.
11. По формуле (15) определите постоянную Стефана- Больцмана.
12. Вычислите относительную погрешность

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma - \sigma_{ТАБЛ}}{\sigma_{ТАБЛ}}.$$

Табличное значение постоянной Стефана- Больцмана $\sigma_{ТАБЛ} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м²·с·К⁴).

13. По данным таблицы 1, рассчитайте значения $\ln T$ и $\ln W$
14. Постройте график зависимости $\ln T$ от $\ln W$;
15. Рассчитайте тангенс угла наклона этой зависимости.

Примечание: график зависимости- прямая, тангенс угла наклона которой должен быть равен 4 в пределах точности измерений.

15. Сделайте выводы

Вопросы

1. Какое излучение тела называется тепловым?
2. Что такое световой поток?
3. Что называется энергетической светимостью тела или интегральной излучательной способностью?
4. Как связаны между собой интегральная и спектральная излучательные способности?
5. Что называется поглотительной способностью?
6. Какое устройство может служить моделью АЧТ?
7. В чем смысл закона Кирхгофа для равновесного теплового излучения?
8. Чему равняется универсальная функция Кирхгофа?
9. В чем состоит основной смысл квантовой гипотезы Планка для теплового излучения?
10. Что определяет коэффициент черноты тела?
11. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана и поясните его.
12. Сформулируйте закон смещения Вина и поясните его.