

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор-директор ЭНИН  
\_\_\_\_\_ И.О. Фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Л. Н. Никитина

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Название» для студентов II курса,  
обучающихся по направлению 140600  
«Электротехника, электромеханика  
и электротехнологии»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2018

УДК 000000  
ББК 00000  
А00

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
<название кафедры> ЭНИИ  
« 10 » октября 2018 г.

Зав. кафедрой <название кафедры>  
кандидат технических наук \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия

Председатель учебно-методической  
комиссии \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия

*Рецензент*

Заместитель генерального директора ОАО «НИКИ» г. Томска  
С.А. Окунев

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

© Анিকেенко В.М., Марьин С.С.,  
Анисимова О.А., 2018

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

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

## Введение

Поток световой энергии, падающий на поверхность непрозрачного тела, частично отражается, а частично поглощается. Поглощаемая энергия преобразуется в иные формы энергии, чаще всего в энергию теплового движения. Поэтому тела, поглощающие лучи, нагреваются. Тело, нагретое до температуры большей, чем температура окружающей среды, отдает теплоту в виде излучения электромагнитных волн (непрерывный спектр). Такое излучение называется *тепловым*. Таким образом, тепловое равновесное излучение осуществляется за счет энергии хаотического движения частиц тела.

Мощность излучения  $\Phi$  или лучистый поток представляет собой *энергию, переносимую излучением за единицу времени при данной температуре*

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

*Энергетическая светимость* – количество энергии, излучаемая единицей поверхности тела в одну секунду по всем длинам волн (иначе эта величина называется интегральной плотностью излучения или интегральной энергетической светимостью)

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

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

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 излучения 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).

Спектральная испускательная и поглощательная способности любого тела связаны между собой законом Кирхгофа: отношение спек-

тральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной 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.

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.

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

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad (9)$$

или

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

Итак, полная энергия, излучаемая абсолютно черным телом в 1 с, пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана-Больцмана),  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К<sup>4</sup>) – 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  $\alpha$ – коэффициент серости, который показывает, во сколько раз серое тело излучает энергии меньше, чем АЧТ при той же температуре.

Для получения закона смещения Вина необходимо исследовать (8) на

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

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (13)$$

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

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

### Метод измерений

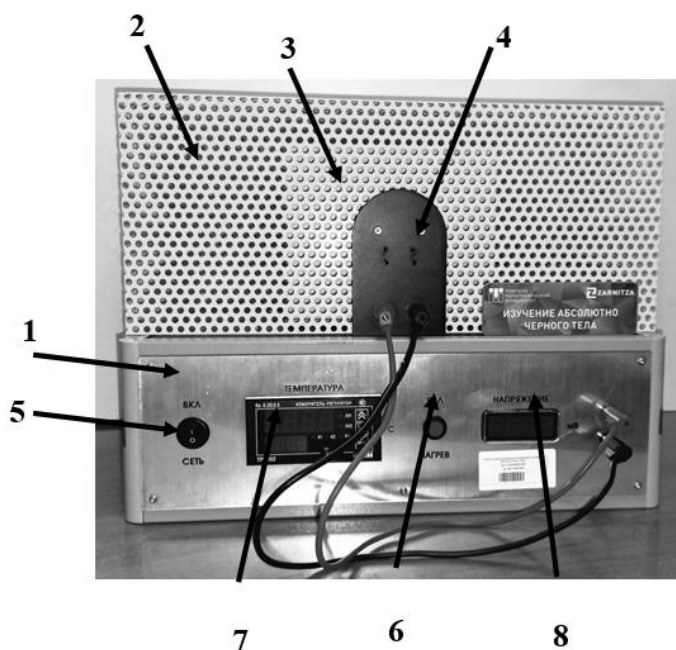
Из уравнения (11) следует, что мощность излучения прямо пропорциональная четвертой степени температуры, тогда постоянная Стефана-Больцмана может быть определена из графика зависимости  $W=W(T^4)$  как

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

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

### Описание установки

Конструктивно 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.



- 1- блок управления;
- 2- защитный экран;
- 3- печь;
- 4- термостолбик;
- 5- кнопка вкл.\выкл. «СЕТЬ» блока управления;
- 6- кнопка вкл.\выкл. «НАГРЕВ» печи;
- 7- измеритель температуры;
- 8- измеритель напряжения термостолбика.

Рис.1 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 клемма «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 100<sup>0</sup>С до 250<sup>0</sup>С.

Таблица 1

### Экспериментальные результаты

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

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  $W$  связана с показаниям ЭДС термостолбика  $U$  как

$$W=0.61 \cdot 10^3 \cdot U$$

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

$$\sigma_{ТАБЛ} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4).$$

13. 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.