

# Лабораторная работа 45

## **Изучение законов теплового излучения**

Цель работы: исследование зависимости энергетической светимости термостолбика от температуры. Оценка постоянной Стефана – Больцмана. Исследование закона смещения Вина.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

### Тепловое излучение.

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 (температурным). Таким образом, тепловое равновесное излучение осуществляется за счет энергии хаотического движения частиц тела.

Обозначим через *энергетическую светимость* количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в одну секунду по всем длинам волн (иначе эта величина называется еще *интегральной плотностью излучения, интегральная энергетическая светимость*)

$$R_T = \frac{dE_{изл}}{dSdt} = \frac{dW}{dS} , \quad (1)$$

где  $E_{изл}$  — полная энергия, излучаемая телом,  $S$  — площадь излучающей поверхности,  $t$  — время,  $W$  — мощность излучения, размерность  $[R_T] = \text{Дж/м}^2 \cdot \text{с} = \text{Вт/м}^2$

Измерения показывают, что энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускают нагретыми телами. Энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности тела в единичном интервале длин волн, называется **монохроматической (дифферен-**

циальной) плотностью излучения или иначе **спектральная плотность энергетической светимости**.

$$R_{\lambda,T} = \frac{dE_{\lambda,\lambda+d\lambda}}{dS d\lambda} \quad (2)$$

Из определения вытекает связь между *светимостью* и *излучательной способностью* тела:

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

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдается поглощение, отражение и пропускание энергии. Величина, равная отношению энергии *поглощенного* света к энергии *падающего*, называется **коэффициентом поглощения** или **поглощающей способностью** тела

$$\alpha = \frac{E_{\lambda \text{ погл}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (4)$$

Величина, равная отношению энергии *отражённого* света к энергии *падающего* называется **коэффициентом отражения** или **отражательной способностью** тела. Коэффициент безразмерный и показывает, *какую долю падающего излучения* в интервале длин волн  $\Delta\lambda$  тело *отражает*

$$\rho = \frac{E_{\lambda \text{ отр}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (5)$$

Величина, равная отношению энергии света, *прошедшего* через данное тело (среду) ко всей *падающей* энергии, называется **коэффициентом пропускания**

$$\tau = \frac{E_{\lambda \text{ прох}}}{E_{\lambda \text{ пад}}} \quad (6)$$

Коэффициент пропускания характеризует прозрачность тела по отношению к падающему излучению. Измерения показывают, что коэффициенты **поглощения**, **пропускания** и **отражения** тела зависят не только от длины волны падающего излучения, но и от температуры тела, то есть

$$\alpha = f_{\alpha}(\lambda, T); \quad \tau = f_{\tau}(\lambda, T); \quad \rho = f_{\rho}(\lambda, T). \quad (7)$$

Для монохроматического излучения они называются **спектральными коэффициентами поглощения, пропускания и отражения** и обозначаются

$$\alpha_{\lambda, T}, \quad \tau_{\lambda, T}, \quad \rho_{\lambda, T}.$$

Таким образом, для монохроматического потока введем характеристику поглощения тела (*спектральная поглощательная способность*) — отношение поглощенного потока  $d\Phi_{\lambda, T}^{пол}$  к величине падающего потока  $d\Phi_{\lambda, T}^{пад}$ :

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{d\Phi_{\lambda, T}^{пол}}{d\Phi_{\lambda, T}^{пад}}$$

Спектральные лучеиспускательная и поглощательная способности тела зависят от длины волны падающего излучения, температуры тела, а также от свойств тела и его поверхности.

Тело, у которого  $\alpha_{\lambda, T} = 1$  для всех длин вели, называется *абсолютно черным*. Если спектральная поглощательная способность тела в некоторой области длин волн постоянна ( $\alpha_{\lambda, T} < 1$ ), тело в этой области спектра считается *серым*. Абсолютно черное тело (АЧТ) (точнее, абсолютно поглощающее) — полностью поглощает все падающие 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 чёрным. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью, приближаются по своим свойствам к абсолютно чёрным в ограниченном интервале длин волн. Реальные тела, называемые чёрными, поглощают хорошо только излучения видимой области спектра.

Тем не менее, можно указать на тело, которое по своим свойствам практически не будет отличаться от абсолютно чёрного тела — это очень малое отверстие в некой 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 абсолютно черного тела может быть нагрета до высоких температур. Тогда из отверстия в полости выходит интенсивное излучение, и отверстие будет ярко светиться (при этом оно по-прежнему остается абсолютно поглощающим). Излучение абсолютно чёрного тела иногда называется "**чёрным излучением**", а само тело — "**полным излучателем**". Топочное устройство с "глазком" в плавильных или коксовых печах, муфельные печи с отверстием, зрачок глаза являются примерами (моделями) абсолютно чёрных тел.

Спектральные лучеиспускающая и поглощающая способности любого тела связаны между собой *законом Кирхгофа*: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры.  $r_\lambda$  - универсальная функция Кирхгофа:

$$\frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}.$$

Таким образом, закон Кирхгофа можно выразить равенством:

$$\left( \frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_1 = \left( \frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_2 = \dots = \left( \frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_n = r_{\lambda,T}$$

Допустим, что одно из этих тел абсолютно черное, обозначим его излучательную способность через  $u_{\lambda,T}$ . Учитывая, что коэффициент поглощения абсолютно чёрного тела равен единице, можем записать закон Кирхгофа так

$$\frac{R_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = \frac{u_{\lambda,T}}{1} = r_{\lambda,T}. \quad (8)$$

Следовательно, универсальная функция Кирхгофа есть спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела

Для абсолютно чёрного тела  $\alpha = 1$  при всех температурах, поэтому  $R$  и есть его светимость при температуре  $T$ . Так как для всех тел  $\alpha < 1$ , то светимость серых (не чёрных) тел всегда меньше, чем у абсолютно чёрного тела. Основываясь на гипотезе о квантовой природе излучения, Планк методами статистической физики показал, что

$$u_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (12)$$

где  $h = \hbar \cdot 2\pi$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $c$  – скорость света.

На основании формулы (3) интегральную интенсивность излучения абсолютно черного тела можно получить интегрированием функции Планка по всему интервалу длин волн

$$R = \int_0^{\infty} u_{\lambda,T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad (13)$$

или

$$R = \sigma T^4. \quad (14)$$

Итак,

полная энергия, излучаемая абсолютно чёрным телом в 1с, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

**(закон Стефана–Больцмана)**

$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К<sup>4</sup>) — *постоянная Стефана–Больцмана* была определена опытным путем. В единицах СИ она выражается в Дж/(м<sup>2</sup>·с·К<sup>4</sup>).

Пользуясь известным значением, Макс Планк впервые определил свою постоянную  $h$  (*постоянная Планка*).

Из закона Стефана–Больцмана следует, что количество теплоты, передаваемое единицей поверхности абсолютно черного тела, находящегося при температуре  $T_1$ , в окружающую среду, имеющую температуру  $T_2$ , если среду можно рассматривать как абсолютно черное тело, равно

$$R = R_1 - R_2 = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (15)$$

Излучение всех остальных тел подчиняется такой же закономерности, их излучение для каждой длины волны в  $a_T$  раз меньше, чем для абсолютно чёрного тела. Полное излучение

$$R = a_T \sigma T^4, \quad (16)$$

где  $a_T$  — константа вещества (иначе называемая *коэффициентом серости*), которая показывает, *во сколько раз серое тело излучает энергии меньше, чем абсолютно чёрное, взятое при той же температуре*.

Из формулы Планка можно сделать вывод о распределении излучения по длинам волн. Максимум интенсивности излучения определяется из условия

$$\frac{du_{\lambda,T}}{d\lambda} = 0,$$

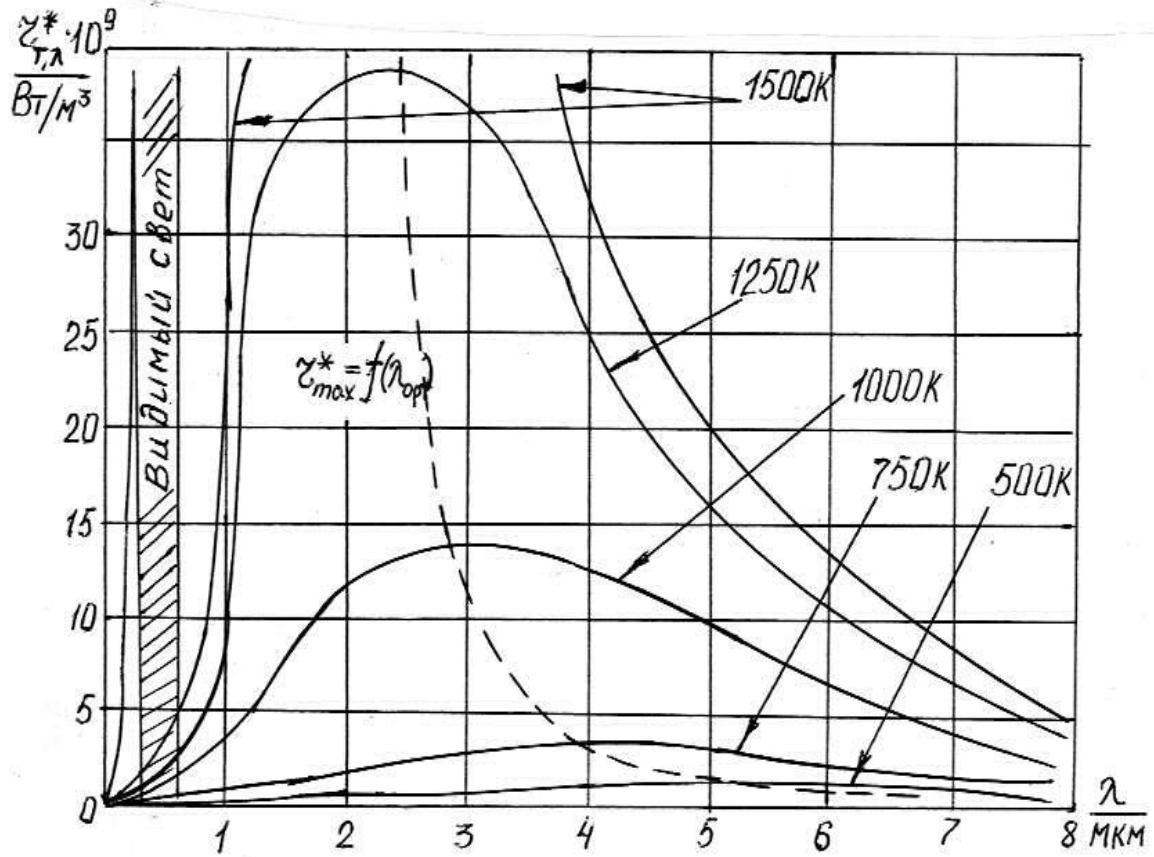
что приводит к выражению

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (17)$$

где  $b$  ( $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$  м·К).

**Закон смещения Вина** - длина волны, на которую приходится максимум интенсивности излучения, обратно пропорциональна температуре, то есть максимум излучения с увеличением температуры смещается в сторону коротких длин волн.

Характер зависимости (12) для разных температур показан графически на рис. 1.



Формула Планка согласуется с результатами исследований технических моделей абсолютно черного тела и экспериментально установленными законами.



## **Устройство и принцип работы установки**

Установка состоит из объекта исследования (печи), устройства измерительного и термостолбика, выполненных в виде конструктивно законченных изделий, устанавливаемых на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелями.

Объект исследования (печь) представляет собой модель абсолютно черного тела и выполнен как закрытая термоизолированная электропечь с отверстием на передней стенке. В его состав входят устройство нагревательное, встроенное в теплозащитный корпус, термопара для измерения температуры внутри печи контактным способом, регулируемый источник питания, предназначенный для разогревания печи до температуры 800°C и регулирования скорости нагрева и вентиляторы для охлаждения печи.

### ***Объект исследования***

На передней панели объекта исследования размещены:

- отверстие для выхода излучения печи;

выключатель СЕТЬ - предназначен для включения питания печи (включение питания индицируется подсветкой переключателя);

выключатель ВЕНТ. - предназначен для включения питания вентиляторов при охлаждении печи (включение вентиляторов индицируется светодиодом, установленным над выключателем ВЕНТ.).

Примечание - в связи с тем, что напряжение питания вентиляторов подается с устройства измерительного, работа печи возможна только при подключенном к ней и включенном устройстве измерительном.

На верхней крышке расположена ручка регулировки скорости нагрева

печи. Шкала, приведенная на верхней крышке, указана в условных единицах скорости нагрева. Положению ручки "MIN" соответствует почти нулевая скорость нагрева печи (мощность к нагревательному элементу почти не подводится), а положению "MAX" соответствует максимальная скорость нагрева (к нагревательному элементу подводится максимальная мощность) и соответственно максимальная температура нагрева печи.

На задней панели объекта исследования расположены клемма заземления, держатели предохранителей с предохранителями 3,15 А, разъем для подключения сетевого шнура и кабель с разъемом для подключения объекта исследования к устройству измерительному.

Объект исследования с помощью сетевого шнура подключается к сети 220 В, 50 Гц.

Устройство измерительное выполнено в виде конструктивно законченного изделия. В нем применены аналого-цифровые преобразователи с индикацией и нормирующими усилителями для измерения и индикации температуры печи и термо-ЭДС термостолбика. В состав устройства измерительного входят также источники питания для питания, как самого устройства, так и объекта исследования.

### ***Устройство измерительное***

На передней панели устройства измерительного размещены следующие органы управления и индикации:

индикатор мВ - предназначен для индикации напряжения термо-ЭДС термостолбика;

индикатор °С - предназначен для индикации температуры в печи.

На задней панели устройства измерительного расположены выключатель СЕТЬ, клемма заземления, держатели предохранителей с

предохранителями 1А (закрыты предохранительной скобой), сетевой шнур с вилкой и разъемы для подключения объекта исследования и термостолбика.

Устройство измерительное с помощью сетевого шнура подключается к сети 220 В, 50 Гц.

Термостолбик представляет собой датчик потока излучения (мощности излучения) и имеет кабель для подключения его к устройству измерительному. С помощью стойки термостолбик устанавливается на штативе. В качестве термочувствительного элемента применяется батарея хромель-копелевых термопар. В термостолбик, также, встроен нагревательный элемент, который предназначен для калибровки термостолбика в единицах лучистого потока.

Для защиты от конвекционного нагрева перед термочувствительным элементом установлена слюдяная пластина.

***Принцип действия установки*** основан на лабораторном исследовании модели абсолютно черного тела (печи) методом измерения температуры контактным и оптическим способами. С помощью термопары контактным способом измеряется температура в печи, а с помощью термостолбика измеряется приращение потока излучения (мощности излучения), выходящего с печи. Пропорциональность приращения потока излучения напряжению с термостолбика (калибровочная характеристика) показана в приложении В настоящего паспорта. При необходимости, термостолбик можно откалибровать повторно. Схема и методика для калибровки приведена в приложении Б настоящего паспорта.

В процессе выполнения лабораторной работы снимается зависимость изменения термо-ЭДС термостолбика от температуры печи при фиксированном расстоянии между термостолбиком и выходным

отверстием печи.

Режим работы установки прерывистый, через каждые 2 часа работы делается перерыв на 15-20 мин.

### **Порядок проведения работы**

1. Установите термостолбик так, чтобы втулка на передней панели термостолбика вошла в отверстие на передней панели печи. При этом расстояние от излучателя с площадью  $S_{изл} = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  до приемника с площадью  $S_{пр} = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  равно  $L = 0.045...0.050 \text{ м}$ .
2. Подключите сетевые шнуры объекта исследования и устройства измерительного к сети и включите устройство измерительное выключателем СЕТЬ на его задней панели и дайте прогреться в течение 5 мин. (при этом на индикаторах °С и мВ должны установиться значение 000 и 0,00 соответственно).
3. Включите печь с помощью выключателя "СЕТЬ", при этом ручка "МОЩНОСТЬ НАГРЕВА" должна находиться в положении "MIN".
4. Установите ручку "СКОРОСТЬ НАГРЕВА" в положение «5» для того, что бы печь начала нагреваться.
5. Постепенно нагревая печь (скорость нагрева регулируйте с помощью ручки на верхней крышке печи), снимите зависимость напряжения термостолбика от температуры в печи, получив 10 экспериментальных точек: 100 , 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 (в градусах Цельсия).

**Внимание! Отсчеты следует производить, когда напряжение с термостолбика и температура в печи будут медленно меняться.**

**Поэтому, если нагрев слишком быстрый, перед отсчетом следует уменьшить скорость нагрева с помощью соответствующей ручки.**

Все данные измерений (напряжение термостолбика и температура в печи) занесите в Таблицу 1.

6. После достижения максимально заданной температуры печи поверните ручку регулирования скорости нагрева печи в положение "MIN", выключите выключатель "СЕТЬ" на передней панели печи и включите клавишу «ВЕНТ»; при этом начнется охлаждение печи (**вентилятор должен работать**).

Примечание: снятие зависимости энергии излучения от температуры в режиме охлаждения на данной установке невозможно, так как искажаются показания термостолбика вследствие несоответствия динамических характеристик термостолбика и печи.

7. По графику зависимости напряжения термостолбика от мощности электрического замещения (см. Приложение) определите мощность, и данные занесите в таблицу. Оцените значение постоянной Больцмана для каждого измерения, определите ее среднее значение. Оцените погрешность измерения и запишите результат определения постоянной Стефана-Больцмана.
8. После охлаждения печи выключить питание установки выключателями "СЕТЬ" (на задней панели устройства измерительного и на передней панели печи), отключить сетевые вилки устройства измерительного и печи от питающей сети.
9. Так как абсолютно черных тел в природе не существует, а данный объект исследования является лишь моделью абсолютно черного тела, то получаемые результаты могут отличаться от теоретических значений. На полученные результаты влияют отличие поглощающей

способности термостолбика и печи от 1, несоответствие динамических характеристик термостолбика и термопары, при большом нагреве печи кроме излучения с выходного отверстия появляется излучение от ее внешних стенок.

10. Режим работы установит прерывистый, через каждые 2 часа работы делается перерыв на 15-20 мин.

Таблица 1

№ изме- рения	t, °C	U <sub>ТС</sub> , мВ	W <sub>зам</sub> , Вт	T, К	$\sigma = \frac{W}{ST^4}$ , Дж/(м <sup>2</sup> ·с·К <sup>4</sup> )
1.	...	...	...	...	...
	...	...	...	...	...

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловое излучение?
2. Что такое равновесность излучения и почему тепловое излучение, в отличие от люминесцентного, является равновесным?
3. Почему тепловое излучение относится к квантово-оптическим явлениям?
4. Дайте определение основным энергетическим величинам, характеризующим тепловое излучение: поток излучения, спектральная плотность энергетической светимости, энергетическая светимость тела. Каким соотношением спектральная плотность энергетической светимости связана с энергетической светимостью тела? Что называется коэффициентами поглощения, отражения и пропускания?
5. Какое тело называется абсолютно черным? Какова физическая модель абсолютно черного тела.
6. Дайте определения основным законам теплового излучения: закону Кирхгофа, закону Стефана-Больцмана, закону смещения Вина.
7. Что такое фотоны? Как гипотеза и формула Планка позволяют получить и помогают объяснить основные законы теплового излучения?
8. В чем заключалась основная проблема в теории теплового излучения и каков вклад Рэлея и Джинса в ее разрешение?
9. Объясните принцип работы экспериментальной установки.

**Приложение.****Калибровочная характеристика термостолбика.**