

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ПРОВЕРКА ЗАКОНА
СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА**

**Методические указания
для проведения лабораторных работ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ПРОВЕРКА ЗАКОНА СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Методические указания для проведения лабораторных работ

Томск

Издательский Дом Томского государственного университета

2017

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией
физического факультета

Протокол № 2 от «13» октября 2017 г.

Председатель комиссии:  М.А. Баньщикова

В методических указаниях рассмотрено излучение абсолютно черного тела. Приводится теория этого явления. Рассматривается способ экспериментальной проверки закона Стефана – Больцмана и определение аппаратной функции прибора.

Методические указания разработаны для студентов физического, радиофизического и физико-технического факультетов.

СОСТАВИТЕЛЬ: доцент *И.И. Клыков*

РЕЦЕНЗЕНТ: доцент *А.М. Толстик*

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: Проверка закона Стефана–Больцмана, нахождение времен релаксации при нагреве и остывании печи, определение аппаратной функции прибора.

Теория

Излучение телами электромагнитных волн может осуществляться за счет различных видов энергии. Самым распространенным является тепловое излучение. Энергетическим источником излучения этого типа является внутренняя энергия нагретых тел. Тепловое излучение связано с внутриатомными процессами, происходящими в телах при нагреве, и обусловлено переходами атомов и молекул из состояния с большей в состояние с меньшей энергией. При тепловом излучении такой переход реализуется в процессе теплового движения атомов и молекул.

Тепловое состояние тела определяется его температурой. Поскольку тепловое излучение находится в равновесии с излучателем, то и самому излучению может быть приписана та же температура. По этой причине тепловое излучение иногда называют температурным.

Тепловое излучение имеет место при любой температуре. Разница лишь в том, что по мере понижения температуры уменьшается интенсивность и изменяется спектральный состав излучения. Излучение этого вида может существовать независимо от агрегатного состояния вещества в газообразных, жидких и твердых телах.

Если убыль энергии, уносимой излучением, пополнять сообщением соответствующего количества тепла, то можно поддержать излучение неизменным, то есть процесс излучения будет происходить равновесно. Равновесный характер теплового излучения является его важнейшей отличительной особенностью. Способность теплового излучения находится в равновесии с

излучающими телами обусловлена тем, что интенсивность этого вида излучения возрастает с повышением температуры.

Равновесный характер теплового излучения делает возможным применение законов термодинамики решению ряда физических проблем, связанных с излучением этого типа. Именно применение общих термодинамических соображений к излучающим системам позволило установить основные законы теплового излучения, которые рассматриваются ниже.

Интенсивность теплового излучения принято характеризовать лучеиспускательной (излучательной) способностью тела. Под этой величиной понимают количество энергии, испущенной в одну секунду с единицы поверхности излучающего тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π . Эта же величина называется энергетической светимостью.

Тепловому излучению соответствует довольно широкая спектральная область. В связи с этим, излучательная способность тела зависит не только от температуры тела, но и от того спектрального интервала, к которому относится излучение.

Количество энергии, излучаемое телом, имеющим температуру T , в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$, определяется отношением

$$dE_{\lambda T} = E_{\lambda T} d\lambda \quad (1)$$

Величина $E_{\lambda T}$ представляет собой излучательную способность тела для длины волны λ (эту же величину называют спектральной плотностью энергетической светимости). Индексы T и λ подчеркивают, что излучательная способность тела зависит от длины волны и температуры.

Полная энергия, излучаемая телом с температурой T в всём интервале длин волн, определяется равенством

$$E_T = \int dE_{\lambda T} = \int E_{\lambda T} d\lambda \quad (2)$$

Величину E_T называют интегральной излучательной (лучеиспускательной) способностью тела (измеряется в Вт/м²), имеющим температуру T .

При тепловом излучении энергия теплового движения частиц, входящих в состав тела, переходит в энергию испускаемых электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода лучистой энергии в тепловую энергию тела. Для количественного описания процесса поглощения вводится понятие поглощательной способности тела.

Пусть в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает энергия dW_1 , доставляемая электромагнитным излучением в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$. Пусть некоторая его доля dW_2 поглощается телом. Тогда поглощательная способность тела определяется как величина

$$A_{\lambda T} = \frac{dW_2}{dW_1} \quad (3)$$

Очевидно, что $A_{\lambda T}$ есть безразмерная величина. Помимо длины волны и температуры эта величина зависит от материала, формы и состояния поверхности тела. Тело, которое при любой температуре полностью поглощает все падающее на него излучение, называется абсолютно черным телом (АЧТ).

Поглощательная способность абсолютно черного тела $A_{\lambda T}^{black} = 1$. Тело называется серым, если его поглощательная способность одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры T : $A_{\lambda T}^{grey} = A_T$. Следует отметить, что, строго говоря, в природе не существует ни абсолютно черных, ни серых тел. Реальные тела по своим характеристикам могут рассматриваться как таковые только в нескольких спектральных интервалах.

Кирхгоф установил связь между излучательной и поглощательной способностью тела. Согласно закону Кирхгофа, отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и является универсальной функцией длины волны и температуры, равной излучательной способности АЧТ. Математическая запись закона Кирхгофа имеет вид:

$$\left(\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} \right)_I = \left(\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} \right)_{II} = \dots = \left(\frac{E_{\lambda T}^{black}}{A_{\lambda T}^{black}} \right) = \varepsilon_{\lambda T}$$

где учтено, что $\frac{E_{\lambda T}^{black}}{A_{\lambda T}^{black}} = 1$, а $\varepsilon_{\lambda T}$ есть излучательная способность АЧТ.

Из закона Кирхгофа следуют два важных вывода. Во-первых, из всех тел при одной и той же температуре АЧТ обладает наибольшей излучательной способностью, и, во-вторых, любое тело при данной температуре испускает преимущественно лучи таких длин волн, которые оно при той же температуре сильнее всего поглощает.

Абсолютно черных тел в природе не существует. Наилучшим приближением к АЧТ является замкнутая полость, в стенке которой сделано малое отверстие, через которое излучение из полости может выходить наружу. Если стенки полости непрозрачны, то при достаточно малых размерах отверстия излучение, испытав внутри полости многократное отражение, почти полностью поглощается ее стенками. (На самом деле, отверстие для этой модели вообще не важно, оно нужно только чтобы подчеркнуть принципиальную наблюдаемость излучения, находящегося внутри; отверстие можно, например, совсем закрыть, и быстро приоткрыть только тогда, когда равновесие уже установилось и проводится измерение). Таким образом, рассматриваемая полость с малым отверстием может служить достаточно хорошей моделью АЧТ. Если стенки полости поддерживать при некоторой температуре T , то из отверстия в полости выходит излучение, весьма близкое по спектральному составу к излучению АЧТ при той же температуре. Направляя это излучение на какой-либо спектральный прибор и измеряя интенсивность в различных участках спектра, можно найти вид зависимости $\varepsilon_{\lambda T}$ от λ и T .

Получить распределение энергии в спектре излучения АЧТ методами классической электродинамики невозможно, так как излучение подчиняется законам квантовой механики.

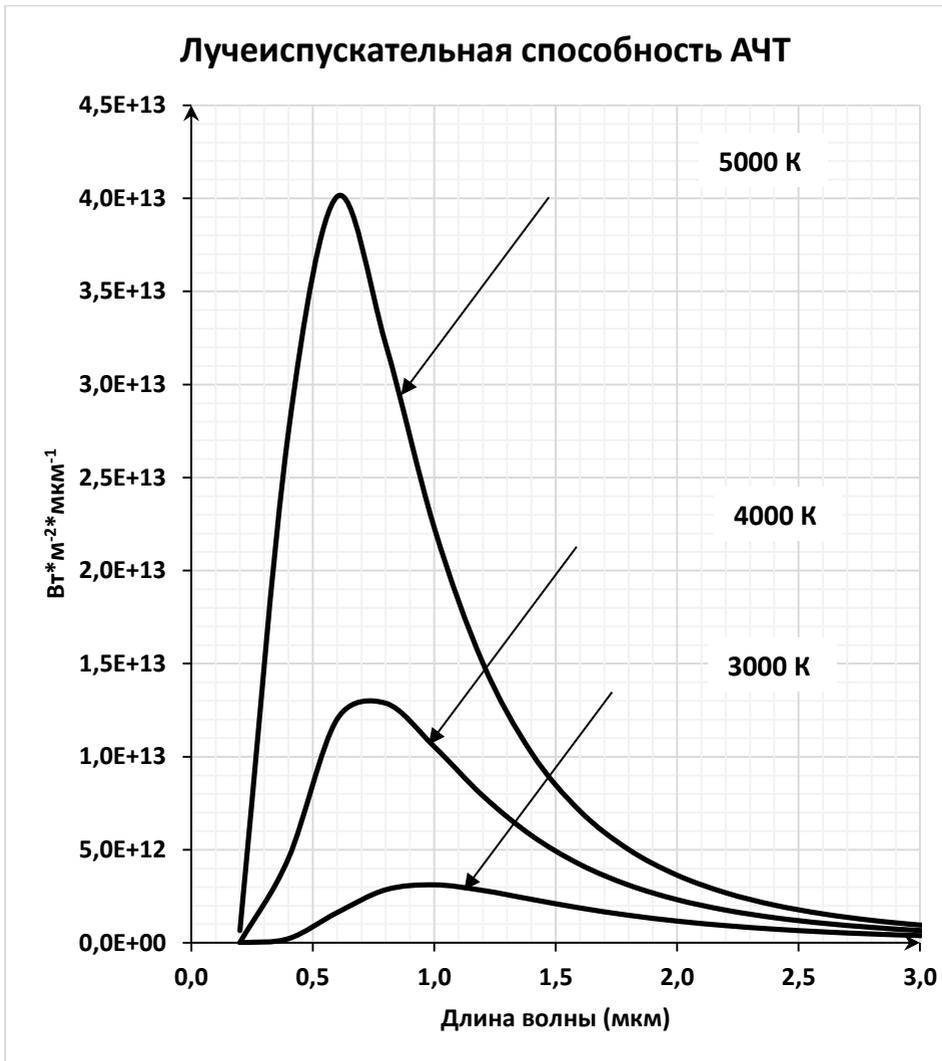


Рис.1. Кривые излучательной способности абсолютно черного тела при разных температурах.

Из рис.1 следуют два важных вывода:

1) излучательная способность АЧТ весьма значительно возрастает с температурой;

2) максимум излучательной способности АЧТ с повышением температуры смещается в область более коротких волн.

Зависимость излучательной способности АЧТ от длины волны и температуры была получена немецким физиком Максом Планком в 1900 г. на основе квантовых представлений:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)} \quad (4)$$

Уравнение (4) может быть получено из свойств фотонного газа, который обладает следующими свойствами:

- Масса фотона равна нулю.
- Фотон электронейтрален, всегда движется со скоростью света и обладает энергией, импульсом и спином равным 1, то есть относится к бозонам. При неупругом столкновении с частицей вещества фотон исчезает, передавая свои энергию и импульс этой частице.
- Квантовая электродинамика допускает взаимодействие фотонов друг с другом, однако вероятность такого их поведения исчезающе мала, поэтому фотоны внутри некоторого объема обычно рассматривают как совокупность не взаимодействующих между собой частиц, то есть как идеальный бозе-газ.
- Температура вырождения фотонного газа равна бесконечности, поэтому фотонный газ вырожден при любых температурах.
- Конденсация Бозе – Эйнштейна в фотонном газе невозможна, так как не существует фотонов с нулевым импульсом (фотоны всегда движутся со скоростью света).

Из эмпирически установленных законов следует отметить результат, полученный Стефаном. Им проводились многочисленные исследования зависимости интегральной

излучательной способности нагретых тел от температуры (величины, которая определяет суммарную энергию излучения всех длин волн, испускаемых телом). Обобщая полученные данные, Стефан пришел к выводу, что интегральная излучательная способность АЧТ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Несколько лет спустя Больцман, исходя из соотношения между плотностью энергии излучения электромагнитных волн и давлением света, чисто термодинамическим путем пришел к заключению, совпадающему с утверждением Стефана. Поэтому закон, определяющий зависимость интегральной излучательной способности АЧТ от температуры, носит название закона Стефана-Больцмана. Этот закон легко получается из распределения Планка (4) интегрированием по всем длинам волн или частотам

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2 d\lambda}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)} = \sigma T^4 \quad (5)$$

Константа

$$\sigma \equiv \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \quad (6)$$

носит название постоянной Стефана-Больцмана.

Интегральная излучательная способность любого тела на основании закона Кирхгофа равна

$$E_T = \int_0^{\infty} A_{\lambda T} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda$$

Поскольку поглощательная способность серых тел не зависит от длины волны, то для серых тел справедливо соотношение

$$E_T^{grey} = A_T \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda = A_T \varepsilon_T = A_T \sigma T^4$$

Закон Стефана-Больцмана для любого (нечерного) тела имеет вид

$$E_T = K \varepsilon_T = K \sigma T^4$$

где K – степень черноты тела, определяемая равенством

$$K = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda T} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda T} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda}{\sigma T^4}$$

Коэффициент излучения (или степень черноты) – K показывает отношение энергии теплового излучения серого тела согласно закону Стефана Больцмана, к излучению абсолютно черного тела при той же температуре. Иногда употребляется термин «коэффициент серости. Численное значение этого коэффициента, полученного экспериментально, для конкретных материала и температуры (интервала температур) приводится в таблицах физических величин. Для серого тела коэффициент K не зависит от температуры и спектрального диапазона. Коэффициент излучения абсолютно черного тела равен единице.

Излучательная способность АЧТ и равновесная плотность энергии электромагнитного излучения в полости связаны соотношением

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{c u_{\lambda T}}{4} \quad (7)$$

Это выражение справедливо как для спектральных, так для интегральных величин.

Используя термодинамические соображения и основные положения электромагнитной теории, немецкий физик Вильгельм Вин установил зависимость между длиной волны, на которую приходится максимум излучательной способности АЧТ (λ_{\max}) и

температурой. Закон, устанавливающий эту зависимость, носит название закона смещения Вина и имеет вид

$$\lambda_m T = b = 0.002898 \text{ м} \cdot \text{К}$$

где b – постоянная Вина.

Открытый Вином закон следует из формулы Планка (4). Для этого необходимо найти экстремум функции (4). В результате дифференцирования получается трансцендентное уравнение, которое решается численными методами и в результате находится постоянная Вина.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Установка состоит из печи, измерительного устройства и термостолбика, выполненных в виде конструктивно законченных изделий, устанавливаемых на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелями. Рис. 2

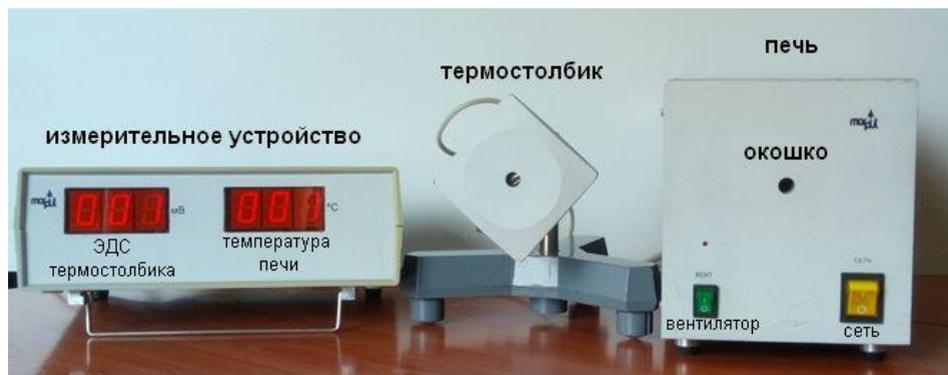


Рис.2. Установка.

Печь представляет собой модель абсолютно черного тела и выполнена как закрытая термоизолированная электропечь с

отверстием на передней стенке. В состав печи входят нагревательное устройство, встроенное в теплозащитный корпус, предназначенное для разогревания печи до температуры 800°C (скорость нагрева печи устанавливается в процессе изготовления установки и регулировке при эксплуатации не подлежит), термопара для измерения температуры внутри печи контактным способом и вентилятор для ускорения остывания печи после нагрева. Существует модификация печи с регулированием скорости нагрева.

На передней панели печи размещены:

- окошко для выхода излучения печи;
- выключатель СЕТЬ - предназначен для включения питания печи (включение питания индицируется подсветкой переключателя);
- выключатель ВЕНТ. - предназначен для включения питания вентилятора при охлаждении печи (включение вентилятора индицируется светодиодом, установленным над выключателем ВЕНТ.).

Так как управление источником питания печи и напряжение питания вентилятора подаются с измерительного устройства, работа печи возможна только при подключенном к ней и включенном измерительном устройстве.

На задней панели печи расположены клемма заземления, держатели предохранителей с предохранителями 5А, разъем для подключения сетевого шнура и кабель с разъемом для подключения объекта исследования к устройству измерительному.

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

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

На передней панели измерительного устройства размещены органы управления и индикации:

- индикатор мВ - предназначен для индикации величины напряжения термо – ЭДС термостолбика;
- индикатор °С - предназначен для индикации значения температуры в печи.

На задней панели измерительного устройства расположены выключатель СЕТЬ, клемма заземления, держатели предохранителей с предохранителями 1 А (закрыты предохранительной скобой), сетевой шнур с вилкой и разъемы для подключения печи и термостолбика.



Рис.3. Измерительное устройство (вид сзади).

Термостолбик представляет собой датчик энергии излучения и имеет кабель для подключения его к измерительному устройству. С помощью стойки термостолбик устанавливается на штативе.

Принцип действия установки основан на лабораторном исследовании модели абсолютно черного тела (печи) методом измерения температуры контактным и оптическим способами.

В процессе выполнения лабораторных работ снимаются зависимость изменения термо – ЭДС термостолбика от температуры печи при фиксированном расстоянии между термостолбиком и выходным отверстием печи.

Режим работы установки прерывистый.

Измерение энергии излучения и температуры электропечи основано на эффекте Зеебека, заключающемся в возникновении электродвижущей силы в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, контакты которых имеют различную температуру.

Два разнородных проводника образуют термопару, а последовательно соединенные термопары – термостолбик. Если контакты (обычно спаи) проводников находятся при различных температурах, то в замкнутой цепи, включающей термопары, возникает термо – ЭДС, величина которой однозначно определяется разностью температур горячих и холодных контактов, количеством последовательно соединенных термопар и природой материалов проводников.

Величина термо – ЭДС, возникающей в цепи за счет энергии падающего на спай термостолбика излучения, измеряется милливольтметром, размещенным на передней панели измерительного устройства. Шкала этого прибора проградуирована в милливольтках.

Температура абсолютно черного тела (печи) измеряется с помощью термоэлектрического термометра, состоящего из одной термопары. Её ЭДС измеряется милливольтметром, также расположенным на передней панели измерительного устройства и проградуированным в °С.

Милливольтметр фиксирует разность температур горячего и холодного спаев термопары, поэтому для получения температуры печи необходимо к показанию прибора прибавить значение температуры в помещении.

Особенность данной установки заключается в том, что нагрев печи идет неравномерно.

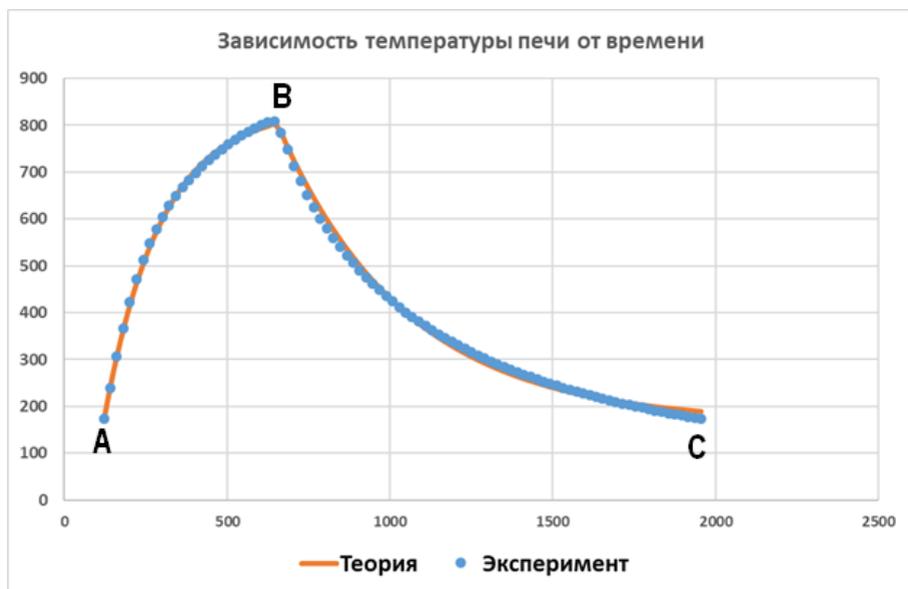


Рис.4. Зависимость температуры (градусы Цельсия) печи от времени (секунды). Максимум (точка В) соответствует времени выключения печи.

Из графика (Рис.4) видно, что нагревание идет очень быстро и непосредственная проверка закона Стефана–Больцмана затруднена вследствие неравномерного прогрева печи и инерционности термостолбика (инерционность термопары существенно меньше, чем у термостолбика и её можно не принимать во внимание). Для корректной обработки необходимо брать измерения после выключения печи (с **выключенным** вентилятором!). Из рис.4 видно, что спад температуры после выключения (dT/dt) существенно меньше по модулю, чем при нагреве печи. Таким образом достигается, что время релаксации печи больше, чем время релаксации термостолбика.

Для проверки закона Стефана – Больцмана используются данные, полученные при остывании печи.

Аппаратная функция

Аппаратная функция – характеристика линейного измерительного устройства, которая устанавливает связь измеренной величины на выходе устройства с истинным значением этой величины на его входе.

В данной работе подтверждением линейности системы служит линейная зависимость ЭДС термостолбика от четвертой степени температуры печи. При невысоких температурах порядка $\leq 200^\circ\text{C}$ не стоит ожидать линейной зависимости в силу слабого излучения, падающего на термостолбик.

Аппаратная функция (коэффициент пропорциональности) находится, как отношение напряжения U_m , создаваемого термостолбиком и пропорционального четвертой степени температуры T печи, к тангенсу угла наклона графика $U_m = U_m(T^4)$, S – ‘эффективная площадь излучателя (устья печи) с поправкой на телесный угол, зависящей от трех параметров – площадь окна термостолбика, площадь излучателя и расстояния между излучателем и термостолбиком:

$$A = \frac{\sigma S}{\operatorname{tg}(\alpha)}$$

Размерность коэффициента $A = \text{Вт/мВ}$. Диаметры устья печи и отверстия термостолбика одинаковы и равны 1 см, то есть площадь этих отверстий $S_0 = 0.7854 \text{ см}^2 = 0,7854 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Термостолбик углублен на $h = 6 \text{ мм}$ от плоскости отверстия. Поправка на телесный угол равна удвоенной поправке из [3], приложение 3, с применением интерполяции и составляет $z = 0.1834$. При таком соотношении диаметров и глубины h эффективная площадь $S = z \cdot S_0 = 0,1440 \text{ см}^2$.

$$A = \frac{\sigma z S_0}{\operatorname{tg}(\alpha)} \quad (8)$$

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

1. Установить термостолбик так, чтобы его отверстие находилось напротив отверстия на передней панели печи и расстояние между плоскостями передней панели объекта исследования и термостолбика было минимальным.
2. Убедиться, что выключатели «СЕТЬ» и «ВЕНТ» на передней панели печи выключены.
3. Включить измерительное устройство выключателем «СЕТЬ» на его задней панели и дать прогреться в течение ~ 5 минут. При этом на индикаторах «°С» и «мВ» должны установиться значения «000» и «0,00» соответственно.
4. Включить печь. При этом выключатель «ВЕНТ» должен находиться в положении «ВЫКЛ». По индикаторам устройства убедиться, что температура печи увеличивается. По мере нагрева печи снимите зависимость энергии излучения от температуры. Удобно воспользоваться фотоаппаратом (смартфоном), делая снимки через равные промежутки времени 5-20 секунд. Диапазон температур, при которых следует производить измерения, 200°С – 800°С. После достижения максимальной температуры печи выключите тумблер СЕТЬ на печи, продолжая измерения при охлаждении печи до 200°С. Шаг измерения температуры порядка 20°С (будет зависеть от момента времени измерения). Результаты занести в таблицу 1 (колонки 1, 2 и 5).

По окончании измерений необходимо охладить печь, включив тумблер «ВЕНТ» на передней панели. При достижении температуры порядка 50°С выключить питание установки выключателями СЕТЬ (на задней панели измерительного устройства и на передней панели печи), отключить сетевые вилки измерительного устройства и печи от питающей сети.

Цикл измерения составляет порядка 40 минут с момента включения печи.

Заметим, что показания термометра не зависят от расстояния между устьем печи и термостолбиком, а зависят только показания милливольтметра, соединенного с термостолбиком.

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

Таблица 1

1	2	3	4	5
t секунды	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + \Delta T + 273$	$T^4(\text{K}^4)$	$U_m(\text{мВ})$

В Таблице 1 экспериментальные данные вводятся в столбцы 1, 2, 5. Поправка ΔT есть комнатная температура в $^{\circ}\text{C}$.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1. Построить график зависимости температуры печи от времени (см. рис.4), используя данные из столбцов 1 и 2. Оценить время релаксации для нагрева и остывания печи. Время релаксации – время, в течение которого величина изменяется в $e = 2.71828\dots$ раз.
2. Построить график зависимости энергии излучения печи от T^4 , используя данные из столбцов 4 и 5. Целесообразно брать данные в диапазоне температур $200^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}$. Удостоверится, что данный график является прямой линией. Найти тангенс угла наклона для графика (измеряется в $\text{мВ}/\text{K}^4$).
3. По формуле (8) вычислить передаточную функцию прибора A в $\text{Вт}/\text{мВ}$, зная постоянную Стефана–Больцмана.

Рекомендации по нахождению времени релаксации.

Время релаксации – период времени, за который амплитудное значение возмущения в выведенной из равновесия физической системе уменьшается в e раз.

Закон Ньютона – Рихмана – эмпирическая закономерность, выражающая тепловой поток между разными телами через разность температур между телами. Для простоты положим, что внутренняя теплопроводность намного больше, чем коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду, тогда внутри устанавливается почти однородная температура. Это предположение выполняется не очень хорошо в нашем случае, но для оценки времени релаксации вполне достаточно.

Зависимость температуры тела при нагревании согласно закону Ньютона – Рихмана:

$$T(t) = T_m \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{(t - t_1)}{\tau_w}\right)\right) + T_1,$$
$$\lim_{t \rightarrow t_0} T = T_m + T_1 = T_{\max} \quad (9)$$

где τ_w – время релаксации, T_{\max} – максимально возможно установившаяся температура печи.

Зависимость температуры тела при охлаждении определяется так:

$$T(t) = T_3 + (T_2 - T_3) \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_2)}{\tau_c}\right) \quad (10)$$

где τ_c – время релаксации, T_3 – установившаяся температура печи при полном остывании. T_3 не равна комнатной температуре, так как термоизоляция эффективно защищает печь от быстрого остывания. Практически T_3 близка к T_1 .

Нахождение времен релаксации заключается в решении системы нелинейных переопределенных уравнений (9) и (10) методом наименьших квадратов. На рис.4 сплошной линией показаны теоретические зависимости (9) и (10). Решение такой системы может быть произведено в многих математических пакетах: Excel, Mathcad, Matlab и других. Для оценки отношения τ_c / τ_w с точностью около 10% можно воспользоваться приближенной формулой

$$\frac{\tau_c}{\tau_w} = \frac{t_B - t_A}{t_C - t_B} \quad (11)$$

где времена берутся соответственно рис.4. Температура T_C совпадает с T_A . Время релаксации при остывании печи можно оценить по двум точкам диаграммы B и C . Для этого берутся значения температур и времен в точках B , C и значения температуры и времени в середине интервала времен B , C . Как следует из (10)

$$\tau_c = \frac{t_C - t_B}{2 \ln \left(\frac{T_C - T_B}{T \left(\frac{t_B + t_C}{2} \right) - T_C} \right)}. \quad (12)$$

Приближенное значение τ_c совпадает с вычисленным по МНК с точностью не хуже 10%. Зная τ_c можно найти время релаксации при нагревании τ_w из соотношения (11).

ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловое излучение?
2. Основные характеристики теплового излучения.
3. Что такое «абсолютно черное тело»? Модель абсолютно черного тела.
4. Основные законы излучения абсолютно черного тела.
5. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.
6. Сформулируйте закон Вина. Получите уравнение для нахождения постоянной Вина из закона Планка.
7. Связь между излучательной способностью реальных тел и АЧТ.
8. Что такое «серое тело»?
9. Что такое коэффициент черноты? От каких параметров он может зависеть?
10. В чем состоит отличие излучения серого тела от излучения абсолютно черного?
11. Опишите свойства фотона. Перечислите основные отличия фотонного газа от классического идеального газа
12. Получите выражение для давления теплового излучения
13. Получите выражение для энтропии теплового излучения
14. Получите выражение для теплоёмкости фотонного газа при постоянном объёме
15. Чему равна средняя энергия фотона теплового излучения?
16. Как зависит объёмная плотность числа фотонов от температуры?
17. Получите формулу Планка в частотном представлении, используя выражение (4).
18. Получите выражение для адиабаты фотонного газа
19. Что такое «ультрафиолетовая катастрофа»?
20. Что такое передаточная функция прибора?
21. Что такое время релаксации?
22. В полости с отражающими стенками находится абсолютно черное тело при некоторой температуре. Объем полости уменьшили квазистатически. Изменилась ли объёмная

- плотность энергии излучения? Температура абсолютно черного тела? Объемная плотность числа фотонов?
23. Оцените, что больше у поверхности Земли: плотность молекул воздуха при обычных условиях или плотность числа фотонов при солнечном освещении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д. В., Общий курс физики. — Издание 3-е, стереотипное. — М.: Физматлит, МФТИ, 2002. — Т. IV. Оптика. — 792 с. — ISBN 5-9221-0228-1.
2. А.С. Кондратьев, П.А. Райгородский, Задачи по термодинамике, статистической физике и кинетической теории, 540200 (050200) Физико-математическое образование, М., Физматлит, 2007.
3. Кабардин О.Ф., Практикум по ядерной физике, М, Просвещение, 1965, 215 с., Приложение 3, с.206

Приложение. Полезные формулы.

$$E(\omega, T) / A(\omega, T) = \varepsilon(\omega, T). \quad \varepsilon = cu / 4.$$

$$\bar{\varepsilon} = kT; \quad \bar{\varepsilon} = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1).$$

$$\varepsilon(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2 (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)},$$

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)}.$$

$$\varepsilon(T) = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 \equiv \sigma T^4.$$

$$\sigma \equiv \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ Bm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$y \equiv hc / \lambda kT. \quad 5e^{-y} + y - 5 = 0.$$

$$\lambda_m T = b = 0.002898 \text{ м} \cdot \text{K}.$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi}{6}, \quad \int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 2.404\dots, \quad \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}.$$

$$U = 4\varepsilon V / c = 4\sigma T^4 V / c = aT^4 V. \quad a \equiv 4\sigma / c.$$

$$S = 4aT^3 V / 3. \quad p = aT^4 / 3. \quad pV^{4/3} = \text{const.}$$

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 2913 от «9» декабря 2017 г. Тираж 50 экз.

