

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ**
для студентов специальностей
290300, 290600, 290700, 290800,
291000, 291400, 291500

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 59

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ
СТЕФАНА — БОЛЬЦМАНА**

Казань
2013

УДК 539.1

Составитель: Алексеев В. В.

Под редакцией Маклакова Л. И.

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов специальностей 060811, 060815, 240400, 290300, 290600, 290700, 290800, 291000, 550100.

Лабораторная работа № 59. "Определение постоянной Стефана — Больцмана"/ Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Составитель Алексеев В. В. Казань, 2013 г., 9 с.

В работе рассмотрены вопросы, связанные с тепловым излучением. Дана краткая теория. Приведена установка, на которой проводятся измерения.

Табл. 1, рис. 3

Рецензент: доцент Казанского государственного университета Л. Д. Зарипова

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2013 г.

Целью данной лабораторной работы является изучение законов теплового излучения нагретых тел и одного из методов измерения высоких температур, основанного на этих законах.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Целый ряд физических явлений сопровождается излучением света, т.е. электромагнитных волн видимого диапазона. Так, свет излучается в ходе некоторых химических реакций, при пропускании электрического тока через газы, при воздействии радиоактивного излучения на некоторые вещества и т.д. При нагревании всякое вещество излучает электромагнитные волны инфракрасного (с длиной волны λ_0 в вакууме в интервале от 750 нм до 0,5 мм), видимого (λ_0 от 400 до 750 нм) и ультрафиолетового (λ_0 от 1 до 400 нм) диапазонов. *Излучение электромагнитных волн нагретыми телами* называется **тепловым**. Необходимо отметить, что тепловое излучение происходит при любой температуре выше 0 К. Однако при невысоких температурах излучаются только инфракрасные волны, не воспринимаемые человеческим глазом. Для характеристики теплового излучения используется энергетическая светимость и излучательная (испускательная) способность тела. **Излучательная способность тела** $r_{\lambda T}$ определяется как *мощность излучения* (энергия излучения в единицу времени) *с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн вблизи излучаемой длины волны λ* . Если на интервал длин волн $d\lambda$ приходится мощность излучения $dP_{\lambda T}$, то, согласно определению, излучательная способность тела равна:

$$r_{\lambda T} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dP_{\lambda T}}{d\lambda}, \quad (1)$$

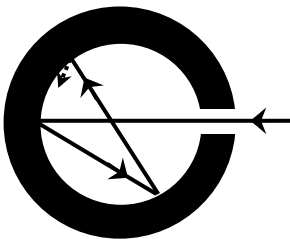
где S — площадь поверхности излучающего тела.

Энергетическая светимость тела R_{Σ} есть *мощность излучения с единицы поверхности тела во всём диапазоне излучаемых длин волн*, т.е. она равна сумме мощностей, излучаемых с единицы поверхности на каждой длине волны:

$$R_{\Sigma} = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} \cdot d\lambda. \quad (2)$$

Тело может не только излучать энергию, но и поглощать падающее на него излучение. Пусть в падающем на тело излучении на интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ приходится мощность $dP_{\lambda T}$. При этом часть этой мощности $dP'_{\lambda T}$ поглощается телом, а другая отражается. Тогда величина

$$a_{\lambda T} = \frac{dP'_{\lambda T}}{dP_{\lambda T}} \quad (3)$$



называется **поглощательной способностью тела**. Она показывает, какая доля от общей мощности падающего излучения вблизи данной длины волны λ поглотилась. Очевидно, что поглощательная способность тела изменяется от нуля до единицы, т.е. $0 \leq a_{\lambda T} \leq 1$.

Рис. 1

Как излучательная, так и поглощательная способность тела существенно зависят от длины волны излучения, от свойства тела, а также от его температуры. Например, обычное стекло обладает малой поглощательной способностью в видимой области спектра, т.е. свет свободно проходит через него, и большой поглощательной способностью — в ультрафиолетовой. Кроме того, для всякого реального тела величина поглощательной и испускательной способности сильно зависит от состояния его поверхности: характера обработки, наличия плёнки окислов и т.д. Следовательно, поглощательная и испускательная способность определяется типом реального тела и состоянием его поверхности. Поэтому физику излучения развивали применительно к абсолютно чёрному телу. Тело, поглощающее всё падающее на него излучение, называется **абсолютно чёрным**, т.е. его поглощательная способность

$a_{\lambda T}^0$ равна единице ($a_{\lambda T}^0 = 1$). Близким к абсолютно чёрному телу являются сажа и чёрный бархат (отсюда и название по их чёрному цвету). Однако наилучшим приближением является небольшое отверстие в полости, внутренняя поверхность которой покрыта, например, сажей (рис. 1). Всякое излучение, попавшее в него, имеет малую вероятность выйти обратно, так как оно должно испытать множество отражений от стенок полости, при каждом из которых большая часть энергии поглощается. Поэтому практически всё излучение полностью поглощается. Нагревание такой полости позволяет изучать излучение абсолютно чёрного тела.

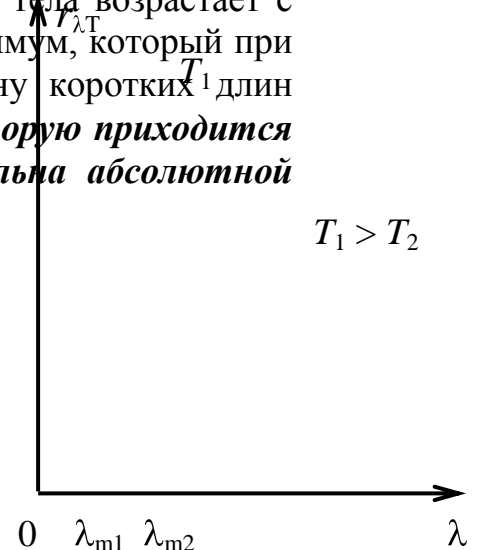
ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

а) Закон Кирхгофа. Излучательная и поглощательная способности любого тела связаны между собой. Эта связь установлена Кирхгофом и носит название **закона Кирхгофа: в состоянии термодинамического (теплового) равновесия отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности — величина постоянная, не зависящая от свойств тела. Она равна излучательной способности абсолютно чёрного тела в том же интервале длин волн и при той же температуре**, т.е.

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}}\right)_2 = \dots = \frac{r_{\lambda T}^0}{a_{\lambda T}^0} = \frac{r_{\lambda T}^0}{1} = r_{\lambda T}^0, \quad (4)$$

где $r_{\lambda T}^0$ и $a_{\lambda T}^0$ — излучательная и поглощательная способность чёрного тела.

б) Закон смещения Вина. В настоящее время зависимость излучательной способности абсолютно чёрного тела от длины волны хорошо изучена. На рис. 2 приведены такие зависимости при различных температурах ($T_1 > T_2$). Из этого рисунка видно, что излучательная способность абсолютно чёрного тела возрастает с температурой. Каждая кривая имеет один максимум, который при возрастании температуры смещается в сторону коротких T_1 длин волн. Вин установил, что *длина волны, на которую приходится максимум излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре:*



$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (5)$$

где λ_m — длина волны, на которую приходится максимальное значение излучательной способности, T — абсолютная температура тела, b — постоянная Вина. Соотношение (5) носит название закона смещения Вина.

в) Закон Стефана — Больцмана.
Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела R_Σ возрастает пропорционально четвёртой степени абсолютной температуры тела, т.е.

$$R_\Sigma = \sigma T^4, \quad (6)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана. На графиках рис. 2 энергетическая светимость R_Σ изображается площадью, заключённой между соответствующей данной температуре кривой распределения

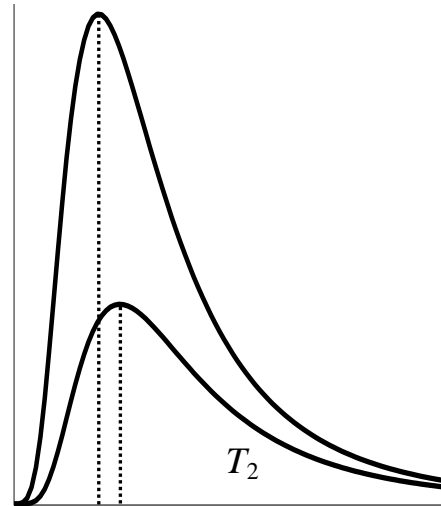


Рис. 2

излучательной способности и осью абсцисс, так как $R_\Sigma = \int_0^\infty r_{\lambda T} \cdot d\lambda$.

Сказанное вытекает из смысла интеграла, как площади под кривой функции.

Кривая излучения абсолютно чёрного тела сыграла ключевую роль в развитии физики. Оказалось, что с точки зрения классической физики невозможно математически описать кривую излучения (рис. 2), и объединить в единую теорию выше рассмотренные законы излучения. Формулу, описывающую зависимость испускательной способности чёрного тела от длины волны, удалось получить Планку. Для этого он предположил, что излучение происходит в виде отдельных порций энергии $\varepsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка, ν — частота электромагнитных волн. Это предположение противоречит классической теории волн, где энергия волны определяется квадратом её амплитуды, а не частотой. Элементарная порция излучения $h\nu$ получила название *кванта*. Дальнейшее развитие физики подтвердило справедливость предположения Планка, и в настоящее время развита новая область физики — квантовая физика, в результате чего были

созданы лазеры, атомная энергетика и многое другое. В теории Планка объединены волновые и корпускулярные представления о природе света, так как квант можно рассматривать как своего рода «частицу» света, получившую название фотон. Формула Планка позволяет вывести все законы излучения абсолютно чёрного тела и, в частности, законы смещения Вина и Стефана — Больцмана.

ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Законы теплового излучения позволяют решить вопрос об измерении температуры в тех случаях, когда нельзя использовать обычные методы — термометры, термопары, термосопротивления. Это имеет место при измерении очень высоких температур, например, раскалённых тел, тел, удалённых от наблюдателя (звёзд). В этих случаях о температуре тела можно судить только по его излучению. *Совокупность методов измерения высоких температур, основанных на законах теплового излучения, в частности, на использовании зависимости излучательной способности тела от его температуры, называется оптической пирометрией.* Приборы, используемые в оптической пирометрии, называются *пирометрами*. В основе одного из методов измерения температуры нагретого тела лежит закон Стефана — Больцмана $R_{\Sigma} = \sigma T^4$. Из формулы ясно, что, измеряя энергетическую светимость тела R_{Σ} и зная постоянную σ , можно определить температуру T . Пирометр, измеряя энергетическую светимость, показывает непосредственно температуру.

ОПИСАНИЕ

УСТАНОВКИ



Рис. 3

Установка состоит из печи (1), измерительного устройства (2) и термостолбика (3) (рис. 3). Она устанавливается на лабораторном столе.

Печь представляет собой модель абсолютно чёрного тела с отверстием на передней стенке. В её состав входят

нагревательное устройство, встроенное в теплозащитный корпус, термопара для измерения температуры внутри печи контактным способом, регулируемый источник питания, предназначенный для разогревания печи до температуры 500°C, и вентиляторы для охлаждения печи. На передней панели печи размещены:

- а) отверстие для выхода излучения печи;
- б) выключатель «СЕТЬ», предназначенный для включения питания печи (включение питания индицируется подсветкой переключателя);
- в) выключатель «ВЕНТ.», предназначенный для включения питания вентиляторов при охлаждении печи (включение вентиляторов индицируется светодиодом, установленным над выключателем «ВЕНТ.»).

На верхней крышке печи расположена ручка регулировки скорости нагрева печи. В положении ручки "MIN" мощность к нагревательному элементу почти не подводится, а положению "MAX" соответствует максимальная подводимая энергия и соответственно максимальная температура нагрева печи.

Печь с помощью сетевого шнура подключается к сети 220 В.

Измерительное устройство выполнено в виде отдельного изделия.

На его передней панели размещены:

1. Индикатор мВ — предназначен для индикации напряжения термоЭДС термостолбика;
2. Индикатор °С — предназначен для индикации температуры в печи.

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

Измерительное устройство с помощью сетевого шнура подключается к сети 220 В.

Термостолбик представляет собой датчик потока излучения (мощности 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 чёрного тела (печи) методом измерения температуры контактным и оптическим способами. С помощью

термопары контактным способом измеряется температура в печи, а с помощью термостолбика измеряется мощность излучения, выходящего из печи.

В процессе выполнения лабораторной работы снимается зависимость изменения термоЭДС термостолбика (напряжения на концах термостолбика) от температуры печи.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

В данной работе ставится задача экспериментального определения одной из физических констант — постоянной Стефана — Больцмана. Суть метода заключается в следующем. Пусть печь (модель абсолютно чёрного тела), имеющая температуру T , излучает в среде, температура которой T_0 . Согласно закону Стефана — Больцмана (6), мощность *излучения* с единицы поверхности тела R_{Σ} равна: $R_{\Sigma} = \sigma T^4$, где σ — постоянная Стефана — Больцмана. Если площадь отверстия печи равна S , то мощность излучения через него равна $P_T = R_{\Sigma} \cdot S = \sigma T^4 \cdot S$. Тогда мощность излучения ΔP , выходящая из отверстия, равна:

$$\Delta P = P_T - P_0 = \sigma S(T^4 - T_0^4). \quad (7)$$

На термостолбик попадает мощность излучения $P_{\text{пр}}$, равная $P_{\text{пр}} = \frac{1}{B} \Delta P$. Здесь B — постоянная, определяемая геометрией прибора. Эта мощность вызывает появление на концах термостолбика напряжения U , которое связано с мощностью падающего излучения соотношением

$$P_{\text{пр}} = kU, \quad (8)$$

где k — константа, определяемая электрическими свойствами термостолбика. Подставляя (7) и (8) в предыдущую формулу, получаем: $kU = \frac{1}{B} \sigma S (T^4 - T_0^4)$. Отсюда $y = \frac{kB}{S} \cdot \frac{U}{T^4 - T_0^4}$. Введём

новую постоянную $C = \frac{kB}{S}$. Тогда

$$y = \frac{CU}{T^4 - T_0^4}. \quad (9)$$

Из технического описания к данной установке $C = 2,3 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2 \cdot В}$.

Из формулы (9) видно, что, определяя из опыта величины U , T и T_0 можно найти значение постоянной Стефана — Больцмана опытным путём.

Необходимо отметить, что в данном случае с помощью термостолбика измеряется разность Δt °С температур печи t °С и комнатной температуры t_0 °С. Поэтому $t - t_0 = \Delta t$ и $t = t_0 + \Delta t$ или по шкале Кельвина,

$$T = T_0 + \Delta T, \quad (10)$$

где $\Delta T = \Delta t$. Принимаем комнатную температуру $T_0 = 300$ К.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Проверьте, поставлен ли выключатель «СЕТЬ» на печи (1) в выключенное положение. Выключатель «ВЕНТ.» должен находиться при этом во включенном положении.
2. Подключите сетевые шнуры печи и измерительного устройства к сети. Дайте прогреться установке в течение 2 — 3 мин. (при этом на индикаторах °С и мВ должны установиться значения 000 и 0,00 соответственно).
3. Поставьте ручку «СКОРОСТЬ НАГРЕВА» на верхней крышке печи в положение 5. Включите печь с помощью выключателя «СЕТЬ».
4. Постепенно нагревая печь, снимите зависимость напряжения U термостолбика от температуры в печи. Отсчёты следует проводить в интервале от 0,1 до 0,7 мВ. Снимите 5 — 7 отсчётов через 0,05 — 0,07 мВ. Отсчёт снимается сразу же после установления очередного напряжения. Отсчёты записывайте в табл. 1.

**ВНИМАНИЕ. НЕ ПЕРЕКРЫВАЙТЕ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ОТВЕРСТИЯ, НАХОДЯЩИЕСЯ
НА ВЕРХНЕЙ КРЫШКЕ КОРПУСА
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА И ПЕЧИ. НЕ
НАГРЕВАЙТЕ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫШЕ 450 °С.**

Таблица 1

$U, мВ$							
$\Delta T, К$							
$T, К$							
$T^4, К^4$							
$(T^4 - T_0^4), К^4$							
$\sigma, \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$							

5. После снятия последнего отсчёта выключите выключатель «СЕТЬ» на передней панели печи, при этом вентилятор должен продолжать работать. Охладив печь до температуры 50 — 130 °С, отключите питание установки, вынув сетевые вилки измерительного устройства и печи из розеток.
6. Переведите температуру из шкалы Цельсия в шкалу Кельвина, используя формулу (10), и запишите эти значения в табл. 1.
7. Вычислите значения T^4 , занося их в ту же таблицу.
8. Вычислите значения $T^4 - T_0^4$. Данные запишите в табл. 1. Принимаем $T_0 = 300 К$.
9. Вычислите постоянную Стефана — Больцмана по формуле (9) для каждой температуры. Значение $C = 2,3 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2 \cdot В}$.
Подсчитайте среднее значение постоянной Стефана — Больцмана.
10. Результаты покажите преподавателю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется тепловым излучением?
2. Что называется излучательной и поглощательной способностью тел и энергетической светимостью тела? От чего они зависят?

3. Что такое абсолютно чёрное тело?
4. Запишите и сформулируйте законы теплового излучения Кирхгофа, Стефана — Больцмана и Вина.
5. Расскажите о сущности гипотезы Планка.
6. Дайте понятие оптической пирометрии.
7. На чём основан метод определения постоянной Стефана — Больцмана?