

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

И.Н. ФЕТИСОВ

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ТЕЛА

*Методические указания к лабораторной работе К-61
по курсу общей физики
Москва, 2010*

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое излучение представляет собой *электромагнитные волны*, испускаемые при температуре выше абсолютного нуля всеми телами за счет их внутренней энергии [1-4].

Для твердых и жидких тел излучение имеет непрерывный спектр в широкой области длин волн. С повышением температуры энергия излучения сильно возрастает, а максимум спектра смещается в область более коротких волн.

Тело не только испускает собственное тепловое излучение, но и отражает падающее на него излучение других тел. Например, глядя на освещенное солнцем тело при комнатной температуре, мы видим отраженный солнечный свет. Однако при этом тело испускает также тепловое излучение в невидимом инфракрасном диапазоне. Если тело нагреть до высокой температуры, то оно будет испускать не только инфракрасное, но и видимое излучение.

Кроме теплового излучения, существует *люминесценция* - свечение вещества, вызванное внешними источниками энергии - ультрафиолетовым излучением (люминесцентные лампы), потоком быстрых заряженных частиц (экран электронно-лучевой трубки) и др. Люминесценция не связана с нагревом вещества. Люминофоры испускают видимый свет при низкой температуре.

Видимый свет имеет длины волн $\lambda = 0,4, \dots, 0,76$ мкм; волны длиннее 0,76 мкм (до 1000 мкм) называются *инфракрасными* (ИК), а короче 0,4 мкм (до 0,01 мкм) - *ультрафиолетовыми* (УФ). Все эти волны вместе взятые образуют *оптический* диапазон.

Методы измерения температуры подразделяют на контактные, когда термометр находится с объектом в тепловом равновесии, т.е. имеет с ним одинаковую температуру, и бесконтактные (оптические).

Бесконтактные термометры основаны на измерении параметров теплового излучения, зависящих от температуры – интенсивности излучения или спектра. При этом тела могут находиться как вблизи, так и на большом расстоянии от прибора.

Оптические термометры используются для измерения температуры в печах, расплавленных металлов, а также в астрофизике. В настоящее время эти методы распространяются на случаи невысоких температур, например, измерения температуры земной поверхности со спутников.

Оптические методы измерения температуры требуют хорошего знания законов теплового излучения.

Цель работы – ознакомиться с законами теплового излучения и с оптическим термометром; в экспериментальной части - измерить температуру тел двумя методами, контактным и бесконтактным, и сравнить результаты измерений.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Характеристики излучения

Энергетические характеристики излучения подразделяют на интегральные (суммарно на всех длинах волн) и спектральные.

К интегральным характеристикам относятся:

* энергия излучения W , Дж;

* поток излучения (мощность) $\Phi = \frac{dW}{dt}$, Вт;

* энергетическая светимость (излучательность) $R = \frac{dW}{dSdt}$, Вт/м², где dW – энергия излучения за время dt с поверхности тела площади dS .

Спектральные характеристики служат для описания распределения энергии излучения по длинам волн или частотам.

В пространстве, заполненном излучением,

* спектральной объемной плотностью энергии называется величина

$$u_{\lambda,T} = \frac{dW}{dVd\lambda}, \text{ Дж/м}^4,$$

где dW – энергия излучения в объеме dV в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$.

* Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) тела равна

$$r_{\lambda,T} = \frac{d\Phi}{dSd\lambda},$$

где $d\Phi$ – поток излучения с площади dS в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$.

Испускательная способность есть мощность излучения с единицы площади в единичном интервале длин волн; единица измерения - Вт/м³.

Для иллюстрации испускательной способности рассмотрим численный пример. Пусть при некоторых условиях $r_{\lambda,T} = 10^9$ Вт/м³. Тогда тело площадью $dS = 10^{-4}$ м² в узком интервале длин волн (при $d\lambda = 0,1$ мкм = 10^{-7} м) испускает поток излучения

$$d\Phi = r_{\lambda,T} dS d\lambda = 10^{-2} \text{ Вт.}$$

Энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости связаны соотношением

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Поток излучения с площади S в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 равен интегралу с пределами от λ_1 до λ_2 :

$$\Phi = S \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Тепловое излучение тела зависит от его способности поглощать излучение. Пусть на непрозрачное тело с температурой T падает поток Φ монохроматического излучения с длиной волны λ , из которого телом поглощается поток $\Phi_{\text{погл}}$, а поток $\Phi_{\text{отр}}$ - отражается: $\Phi = \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{отр}}$.

Спектральным коэффициентом поглощения (поглощательной способностью) называется отношение поглощенного потока к падающему потоку

$$a_{\lambda,T} = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi}.$$

Коэффициент поглощения $a_{\lambda,T}$ – безразмерная величина в пределах от 0 (идеальное зеркало) до 1. Она различна для разных веществ, зависит от длины волны и температуры тела, а также в сильной степени - от состояния поверхности тела (окислы, шероховатость, ржавчина, грязь и т.д.).

В теории теплового излучения важную роль играет понятие *абсолютно черного тела*, для которого

$$a_{\lambda,T} = 1$$

для любых длин волн и температур.

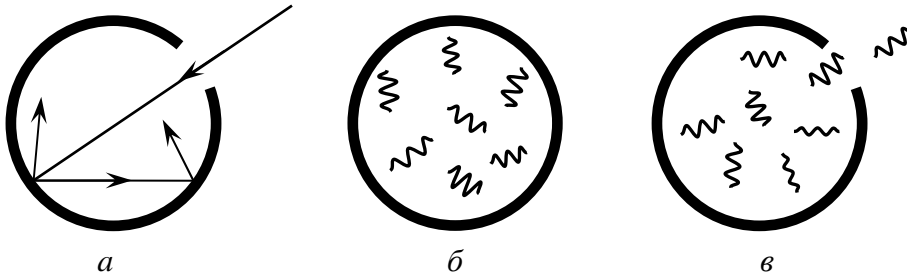


Рис. 1. Нагретая полость:

a – модель абсолютно черного поглощающего тела; *б* – полость, заполненная равновесным тепловым излучением; *в* – отверстие в полости в качестве источника равновесного излучения АЧТ.

Для краткости, абсолютно черное тело будем называть также АЧТ или черным телом.

Хорошим приближением к АЧТ является модель, представляющая собой замкнутую непрозрачную и достаточно большую полость с небольшим отверстием в стенке (рис. 1, *a*). Если излучение падает на отверстие снаружи, оно практически полностью поглощается внутри полости в результате многократных отражений, в каждом из которых часть энергии света поглощается. Само отверстие снаружи является черным телом.

Рассмотрим тепловое излучение в полости, равномерно нагретой до температуры T (рис.1, *б*). Внутренние стенки полости излучают и поглощают электромагнитные волны, которые заполняют полость с некоторой объемной плотностью энергии $u_{\lambda,T}^*$. Величина $u_{\lambda,T}^*$ зависит от длины волны и температуры, но не зависит от материала полости. В стационарном состоянии излучение в полости называют *равновесным тепловым излучением* при температуре T . Вследствие независимости характеристик равновесного теплового излучения от вещества, оно играет фундаментальную роль в физике.

Если в полости сделать небольшое отверстие, как показано на рис. 1, *в*, то через отверстие будет выходить излучение, называемое *равновесным тепловым излучением абсолютно черного тела*.

Испускательная способность АЧТ (отверстия) $r_{\lambda,T}^*$ связана с объемной плотностью энергии в полости $u_{\lambda,T}^*$ соотношением

$$r_{\lambda,T}^* = \left(\frac{c}{4} \right) u_{\lambda,T}^*$$

где c - скорость света.

2. Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа. Рассмотрим произвольные тела с одинаковой температурой T . На одинаковой длине волны λ обозначим их испускательную и поглощательную способность $r_{\lambda, T}$ и $a_{\lambda, T}$.

Кирхгоф теоретически установил, что их отношение одинаково для всех тел и равно испускательной способности АЧТ (все величины для АЧТ отмечены знаком *)

$$\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} = r_{\lambda, T}^* \quad (1)$$

Следовательно, реальные тела, коэффициент поглощения которых меньше единицы, излучают меньше, чем АЧТ при той же температуре и на одинаковой длине волны:

$$r_{\lambda, T} = a_{\lambda, T} \cdot r_{\lambda, T}^* \quad (2)$$

Из закона Кирхгофа следует, что чем больше тело поглощает на некоторой длине волны, тем больше оно испускает собственного излучения на данной длине волны.

Закон излучения Планка. Макс Планк теоретически нашел (1900 г.) формулу, описывающую зависимость $r_{\lambda, T}^*$ от длины волны и температуры абсолютно черного тела. Ее называют *законом излучения Планка*.

Спектральная плотность энергетической светимости АЧТ является следующей универсальной (не зависящей от вещества) функцией длины волны и температуры:

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp \left[\frac{hc}{\lambda kT} \right] - 1 \right)} \quad (3)$$

где h - постоянная Планка; c - скорость света в вакууме; k - постоянная Больцмана. Это ос-

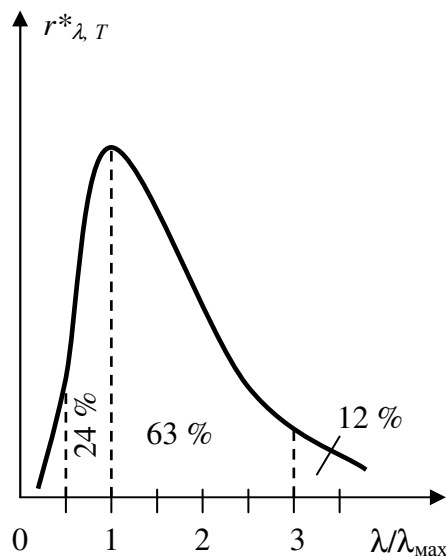


Рис. 2.
Спектр теплового излучения АЧТ

новой закон теплового излучения АЧТ.

При постоянной температуре T зависимость (3) описывает спектр *теплового излучения АЧТ*, т.е. распределение энергии излучения по длинам волн (рис. 2). Излучение имеет сплошной протяженный спектр с максимумом на некоторой длине волны λ_m . Полезно запомнить, что примерно 90% энергии излучается в интервале от $0,5\lambda_m$ до $3\lambda_m$.

Квантовая природа света. Создавая теорию теплового излучения АЧТ, Планк выдвинул *квантовую гипотезу*, согласно которой атомные осцилляторы испускают электромагнитные волны не непрерывно, как следовало из теории Максвелла, а порциями, *квантами*, энергия которых пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Постоянная Планка, как следует из опытов, равна $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Только с помощью квантовой гипотезы удалось объяснить спектр (3) теплового излучения АЧТ.

В дальнейшем квантовая гипотеза получила подтверждение и развитие в работах Эйнштейна по объяснению внешнего фотоэффекта и Комптона по рассеянию рентгеновских лучей на электронах. Было установлено, что кванты, называемые также *фотонами*, импульс которых равен

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

в процессах взаимодействия с электроном ведут себя подобно другим частицам. Для фотонов выполняются те же законы сохранения релятивистской энергии и импульса, что и для частиц вещества.

Таким образом, электромагнитное излучение имеет и волновые, и *корпускулярные* свойства. Волновые свойства проявляются при распространении волны в явлениях интерференции и дифракции, а корпускулярные – в процессах испускания и поглощения фотонов.

Закон смещения Вина. Как видно из рис. 3, спектральная плотность энергетической

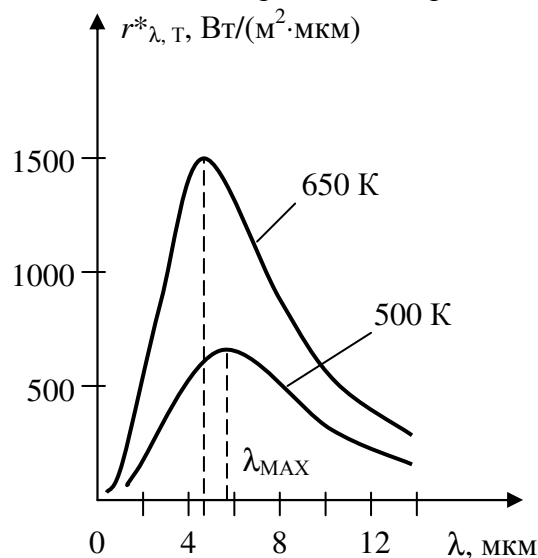


Рис.3.

Спектры излучения АЧТ для различных температур

светимости $r^*_{\lambda, T}$ максимальна на некоторой длине волны λ_m , зависящей от температуры. Вин теоретически установил, что для АЧТ эта длина волны обратно пропорциональна температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (4)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ К·м есть *постоянная Вина*. Например, при $T = 290$ К (“комнатная” температура) $\lambda_m = 10$ мкм. Следовательно, многие окружающие нас тела и мы сами при комнатной температуре излучают примерно 90% энергии в диапазоне от 5 мкм до 30 мкм, т.е. в ИК-диапазоне. На поверхности Солнца температура примерно в 20 раз больше, а длина волны - $\lambda_m = 0,5$ мкм, она соответствует зеленому свету.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела R^* (мощность излучения с единицы площади на всех длинах волн) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела

$$R^* = \sigma T^4. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ называют *постоянной Стефана-Больцмана*.

Поток излучения с площади S черного тела равен

$$\Phi^* = SR^* = \sigma T^4. \quad (6)$$

Например, при температуре 295 К поток излучения с одного квадратного метра поверхности АЧТ равен 430 Вт, а при температуре 2950 К - он в 10 000 раз больше.

Законы смещения Вина и Стефана-Больцмана, открытые ранее закона излучения Планка, следуют из последнего. Так, закон Стефана-Больцмана может быть получен интегрированием функции (3) по длине волны от нуля до бесконечности [1, 2]:

$$R^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^* d\lambda = \sigma T^4,$$

где постоянная Стефана-Больцмана связана с другими физическими константами соотношением

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}.$$

3. Излучение реальных тел

Излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ. Это связано с тем, что их спектральный коэффициент поглощения $a_{\lambda,T}$ не равен единице, зависит от вещества, длины волны, температуры и состояния поверхности [6, 7].

Согласно закону Кирхгофа (2), спектральная плотность энергетической светимости реального тела есть некоторая часть аналогичной величины АЧТ:

$$r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^*.$$

Тела, для которых $a_{\lambda,T}$ зависит от λ , называются телами с *селективным* поглощением. К ним относятся, прежде всего, различные металлы с неокисленной поверхностью (см. кривую 1 на рис. 4).

Тела, для которых величина $a_{\lambda,T} < 1$, но примерно постоянна в некоторой существенной области длин волн, называются *серыми* телами (прямая 2 на рис. 4). Спектральное распределение $r_{\lambda,T}$ для серого тела подобно спектральному распределению $r_{\lambda,T}^*$ черного тела.

Для серых тел приближенно и в ограниченной области температур закон Стефана-Больцмана имеет вид

$$R = a_T \sigma T^4. \quad (7)$$

Безразмерный множитель $a_T < 1$, называемый *коэффициентом излучения (коэффициентом черноты)*, представляет собой эффективный коэффициент поглощения (а, следовательно, и излучения) серого тела. Он может быть различным для разных диапазонов температуры.

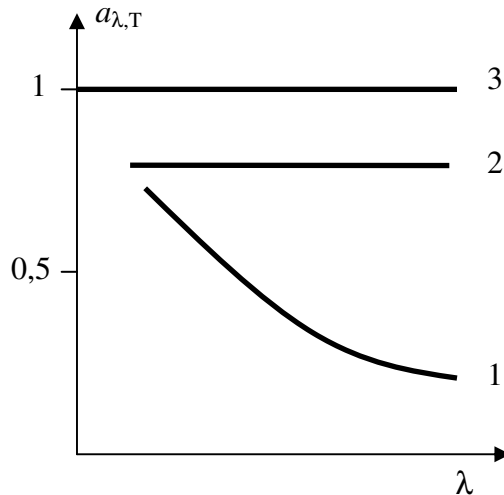


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны: 1 – селективное поглощение; 2 – серое тело; 3 – абсолютно черное тело.

Для металлов значения a_T невелики (0,1 - 0,3) и сильно зависят от состояния поверхности. Для грязных и шероховатых поверхностей a_T значительно выше, чем для очищенных и полированных. Для угля, окислов металлов, грунта, кирпича, бетона значения a_T доходят до 0,9.

4. Оптический термометр

Приборы для бесконтактного измерения температуры называются *пирометрами* (в переводе с греческого – *огонь измеряю*). Их действие основано на измерении характеристик теплового излучения тела, зависящих от температуры.

При температуре $T > 1300$ К пирометры – главные термометры, а при $T > 3000$ К они становятся практически единственными приборами для измерения температуры. Пирометры находят все более широкое применение и для невысоких температур.

Тело, температуру которого измеряют пирометром, должно находиться в состоянии термодинамического равновесия (все его части должны иметь одинаковую температуру).

Пирометры бывают различного типа. В *яркостном пирометре* температуру определяют по яркости свечения объекта на фиксированной длине волны видимого света. Такие приборы, называемые *пирометрами с исчезающей нитью*, имеют простое устройство и широко применяются [1].

В *радиационных пирометрах* регистрируется суммарное излучение, испускаемое телом на различных длинах волн. Действие таких приборов основано на законе Стефана-Больцмана для черного и серого тел (5), (7)). Далее рассматриваем только радиационный пирометр.

Пирометр измеряет температуру тела 3 (см. рис. 5). Диафрагма (отверстие) 2, расположенная вблизи приемника 1, ограничивает его телесный угол обзора и площадь круга 4, с которого излучение попадает в приемник.

В пирометрах применяют *тепловые приемники*, для которых чувствительность одинаковая для различных λ . Поясним принцип действия теплового приемника. Излучение, поглощаемое приемником (в простейшем случае это может быть маленькая пластинка из зачерненной фольги), повышает его температуру на небольшую величину ΔT , пропорциональную поглощенному потоку, который, в свою очередь, составляет определенную часть энергетической светимости тела (см. (7)) $R = a_T \sigma T^4$. Следовательно, $\Delta T \sim T^4$, а температура тела - пропорциональна корню четвертой степени из приращения температуры приемника:

$$T \sim (\Delta T)^{1/4}.$$

Приращение температуры измеряют электрическим датчиком, например термометром сопротивления. Электронная схема преобразует сигнал датчика в цифровую форму, производит необходимые вычисления и выводит на индикатор значение температуры.

Радиационный пирометр калибруют по излучению черного тела известной температуры. Прокалиброванный пирометр дает правильные значения температуры тел, мало отличающихся от АЧТ.

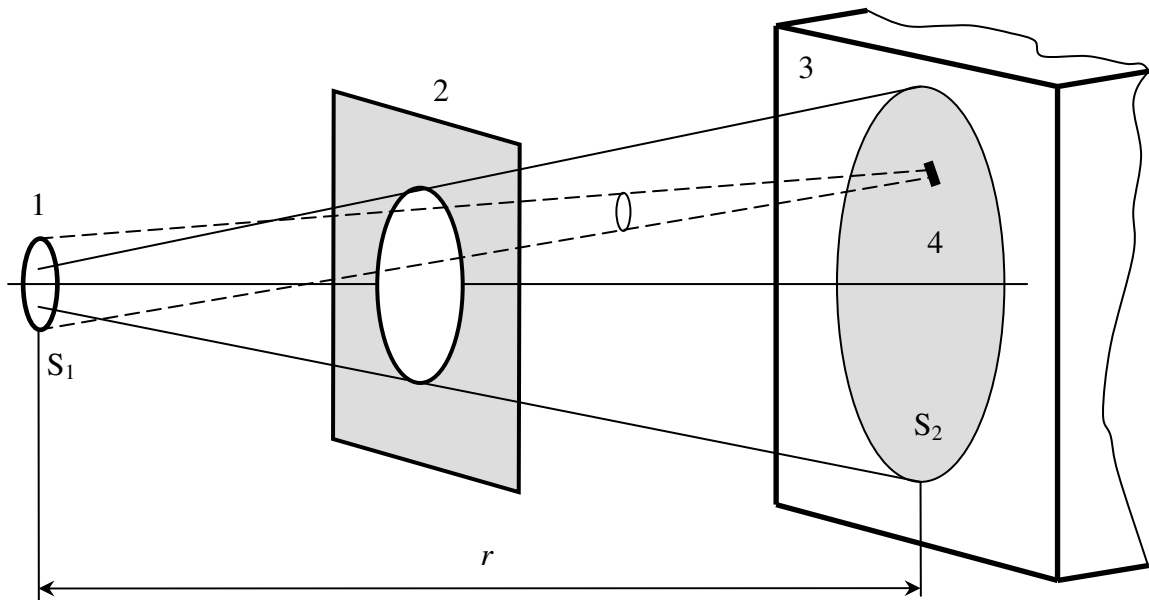


Рис. 5. Схема измерения температуры радиационным пирометром:

1 – приемник; 2 – диафрагма пирометра; 3 – тело, температуру которого измеряют; 4 – площадка, с которой собирается излучение.

Результат измерения температуры не зависит от расстояния r между пирометром и объектом 3 (см. рис. 5). Для этого размеры тела 3 должны превышать круг 4, с которого излучение попадает в приемник.

Пирометр имеет две геометрические характеристики - площадь S_1 приемника и телесный угол обзора Ω_2 , ограниченный диафрагмой 2. В приемник поступает излучение, испускаемое каждым элементом круга 4 в небольшом телесном угле Ω_1 , зависящем от площади S_1 приемника (телесный угол показан штриховыми линиями). Поток излучения, попадающий в приемник, пропорционален площади S_2 круга и телесному углу Ω_1

$$\Delta \Phi = \varepsilon S_2 \Omega_1, \quad (8)$$

где ε - коэффициент пропорциональности, величина которого несущественна для данного анализа. Небольшие телесные углы равны:

$$\Omega_1 = S_1 / r^2 \text{ и}$$

$$\Omega_2 = S_2 / r^2.$$

Подстановкой этих значений в (8) получим

$$\Delta\Phi = \varepsilon S_1 \Omega_2,$$

т.е. регистрируемый поток излучения зависит от параметров приемника (S_1 и Ω_2), но не зависит от расстояния до него.

5. Измерение температуры серых тел

В случае серых тел пирометр показывает не температуру тела T , а так называемую радиационную температуру. *Радиационной температурой* T_r тела называют такую температуру черного тела, при которой поток его излучения совпадает с потоком реального тела. Для нечерных тел радиационная температура меньше термодинамической температуры: $T_r < T$.

Для серого тела с коэффициентом черноты a_T найдем связь его радиационной температуры T_r , измеренной пирометром, с истинной температурой T . Типичные условия измерений показаны схематически на рис. 6. Пирометр 1 измеряет температуру T небольшого нагретого тела 2 (показано штриховкой), находящегося среди других, «посторонних», тел 3 с одинаковой температурой T_0 (примерно 300 К).

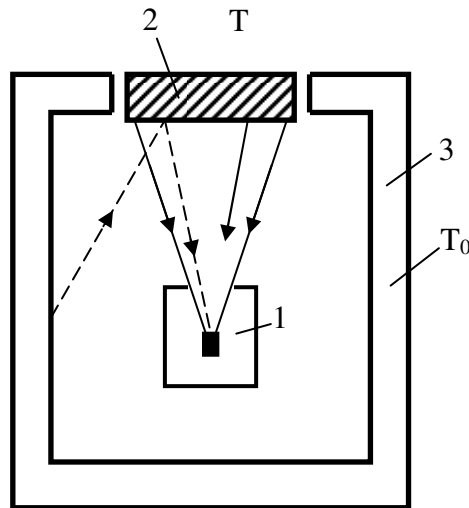


Рис. 6. Схематическое изображение типичных условий измерения температуры:

- 1 – приемник пирометра; 2 – тело, температуру T которого измеряют;
3 – посторонние тела с температурой T_0

Принимаемый пирометром поток излучения Φ разделим на две составляющие: собственное излучение $\Phi_{\text{изл}}$ серого тела при температуре T и отраженное телом излучение $\Phi_{\text{отр}}$ посторонних тел:

$$\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Phi_{\text{отр}} = g a_T \sigma T^4 + \Phi_{\text{отр}}. \quad (9)$$

Коэффициент пропорциональности g учитывает геометрические факторы, его значение существенно для данного анализа.

Выражение для $\Phi_{\text{отр}}$ получим из следующих рассуждений. Поскольку отраженное телом излучение зависит от температуры T_0 посторонних тел и не зависит от температуры T измеряемого тела, то формулу (9) запишем для случая, когда температура измеряемого тела также равна T_0 :

$$\Phi = g a_T \sigma T_0^4 + \Phi_{\text{отр}}. \quad (10)$$

В случае, когда все температуры одинаковые, поток Φ можно не разделять на две составляющие, а рассматривать следующим образом. Приемник 1 пирометра находится в полости, все стенки которой имеют одинаковую температуру T_0 . Полость заполнена равновесным тепловым излучением с температурой T_0 . Характеристики этого излучения не зависят от вещества полости и коэффициента отражения всех тел. Следовательно, на приемник пирометра падает поток излучения абсолютно черного тела, равный

$$\Phi = g \sigma T_0^4. \quad (11)$$

Из (10) и (11) получим

$$\Phi_{\text{отр}} = g (1 - a_T) \sigma T_0^4.$$

Подстановкой этого выражения в (9) получим

$$\Phi = g \sigma [a_T (T^4 - T_0^4) + T_0^4]. \quad (12)$$

Согласно определению радиационной температуры, принимаемый поток равен

$$\Phi = g \sigma T_r^4. \quad (13)$$

Из (12) и (13) находим связь радиационной температуры T_r с термодинамической температурой T

$$T_r^4 = a_T T^4 + (1 - a_T) T_0^4. \quad (14)$$

Если измеряемая температура T достаточно велика по сравнению с температурой посторонних тел T_0 , вторым слагаемым в (14) можно пренебречь. В этом случае

$$T = \frac{T_r}{(a_T)^{1/4}}. \quad (15)$$

Формулу (15) приводят в литературе [1, 5] для нахождения истинной температуры по измеренной радиационной температуре. Но из нашего анализа видно, что она справедлива только для высоких температур, когда роль отраженного излучения холодных посторонних тел несущественна.

Коэффициент черноты a_T тела обычно не известен. Его можно определить, если измерить T_r пирометром, а обычную температуру T - контактным термометром. Тогда a_T находим по формуле, которую получим из (14):

$$a_T = \frac{T_r^4 - T_0^4}{T^4 - T_0^4}. \quad (16)$$

Если радиационная температура измерена, а коэффициент черноты известен, то истинную температуру серого тела вычисляем по формуле, которая следует из (14) и применима как для высоких, так и для низких температур:

$$T^4 = \frac{T_r^4}{a_T} - T_0^4 \left(\frac{1}{a_T} - 1 \right) \quad (17)$$

Из приведенного описания видно, что оптический метод измерения температуры в большей степени пригоден для черных тел. В случае серых тел необходимо вводить поправки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Лабораторная установка

В установке используется бесконтактный “Измеритель температуры инфракрасный АТТ-2508” (торговая марка – «Актаком»). Изготовитель рекомендует применять прибор в тех случаях, когда контактные способы измерения температуры непригодны, например, в случае движущихся предметов, или находящихся в труднодоступном месте, или под высоким напряжением.

Прибор является радиационным пирометром, принцип работы которого рассмотрен выше. Прибор состоит из инфракрасного зонда с тепловым приемником и блока регистрации с цифровой индикацией в градусах Цельсия.

Диапазон измеряемых температур от -10 до $+300$ °С. Рабочие длины волн $6 \dots 12$ мкм. Диафрагма ограничивает «угол обзора» пирометра так, что расстояние от пирометра до объекта не должно превышать семикратный размер объекта (см. пояснение на рис. 5).

Пирометр прокалиброван по телу с коэффициентом черноты $a_T = 0,95$ для длин волн, на которых работает пирометр. Поэтому наиболее точные результаты измерения температуры будут для тел, достаточно темных в инфракрасных лучах. Если чернота тела оценивается визуально, следует учитывать, что коэффициенты поглощения для видимого света и инфракрасных волн могут сильно различаться.

Пренебрегая небольшим различием между $a_T = 0,95$ настройки пирометра и $a_T = 1$ для АЧТ, будем считать, что пирометр измеряет радиационную температуру T_r .

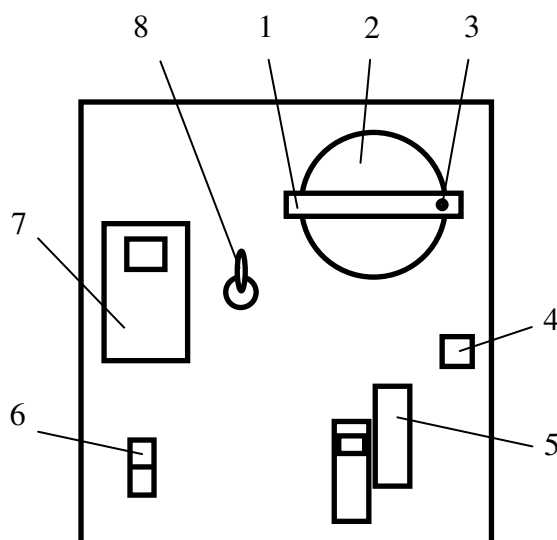


Рис. 7. Схема лабораторной установки:

1 – нагреваемая пластина; 2 – вентилятор; 3 – термопара; 4 – выключатель нагревателя; 5 – пирометр; 6 – кнопки включения питания приборов; 7 – регистрирующий прибор термопары; 8 – выключатель вентилятора

Лабораторный стенд схематически показан в плане на рис. 7. Излучающим телом служит алюминиевая пластина 1 размером 20×12 см и толщины 1,8 см. Пластину равномерно нагревают электрической спиралью (220 В, 400 Вт), расположенной с задней стороны. В углубление 3, просверленное в пластине, вставлена термопара. Термопара соединена проводами с регистрирующим прибором 7; индикация температуры в °С.

Передняя, излучающая, сторона пластины неоднородна по коэффициенту черноты. Половина поверхности пластины сделана шероховатой и покрыта аэрозольной черной крас-

кой. Эту часть будем называть «черной стороной». Другая часть («светлая сторона») - алюминиевая поверхность, ничем не покрытая, без зеркального блеска.

Пирометр 5 находится на расстоянии 23 см от пластины. Пирометр можно перемещать в поперечном направлении для измерения температуры только черной или только светлой половины пластины.

Нагреватель включают тумблером 4 «НАГРЕВАТЕЛЬ» с подсветкой. После включения нагревателя за 30 минут температура возрастает от комнатной до 300 °С.

Питание пирометра и термопары включают кнопками 6 «ПИТАНИЕ ПРИБОРОВ».

По окончании измерений нагреватель выключают и включают вентилятор 2 для быстрого охлаждения пластины. Для включения вентилятора служит тумблер 8 «ВЕНТИЛЯТОР».

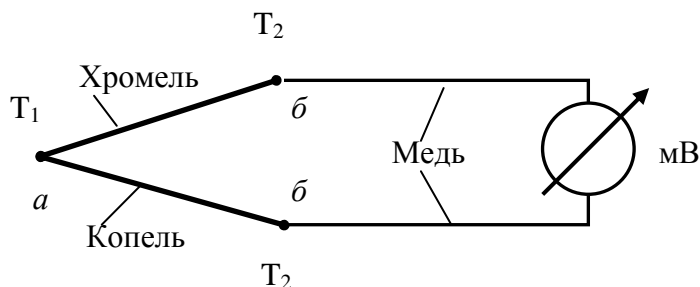


Рис. 8. Схема термопары

Поясним принцип действия термопары (рис. 8). Она изготовлена из двух соединенных между собой разнородных металлических проводников, например, специальных сплавов – хромеля и копеля. Двумя медными проводниками термопара соединена с милливольтметром мВ регистрирующего прибора. Спай *a* термопары имеет измеряемую температуру T_1 , а контакты *б б* термопары с медными проводами поддерживаются при постоянной комнатной температуре T_2 .

Действие термопары основано на *эффекте Зеебека*: при различной температуре спаев *a* и *б* в цепи возникает небольшая термоЭДС U , величина которой зависит только от температур горячего T_1 и холодного T_2 контактов и от материалов проводников. В небольшом интервале температур (сотни градусов) термоЭДС

$$U = \beta (T_1 - T_2).$$

Коэффициент пропорциональности β зависит от материалов проводников и интервала температур.

2. Измерение температуры пластины оптическим и контактным термометрами

Меры безопасности:

1. Установка должна быть заземлена. Клемма заземления расположена на левой стороне корпуса.
2. Недопустимо нагревать пластину свыше 300 °С.
3. Нельзя прикасаться к пластине. Она может быть нагрета или находиться под напряжением.

Порядок выполнения работы.

1. Выключатели «НАГРЕВАТЕЛЬ» и «ВЕНТИЛЯТОР» установить в положение «ВЫКЛ». Вставить сетевую вилку в розетку.
2. Нажать клавиши 6 «ПИТАНИЕ ПРИБОРОВ» (см. рис. 7). Если температура не превышает 40 °С, можно приступить к работе; если больше, включить вентилятор.
3. Подготовить табл. 1 для записи результатов измерений.

4. **Не включая** нагреватель, измерить термопарой температуру пластины T , а пирометром - радиационные температуры для черной стороной T_{r1} и светлой стороны T_{r2} . Результаты измерений в $^{\circ}\text{C}$ записать в табл. 1.

Результаты измерений

Таблица 1

Температура, $^{\circ}\text{C}$			Температура, К		
Термопара T	Черная сторона T_{r1}	Светлая сторона T_{r2}	Термопара T	Черная сторона T_{r1}	Светлая сторона T_{r2}

Примечание. В таблице должно быть 10 строк

5. Включить нагреватель (вентилятор не включать). Одновременно измерять температуры с помощью термопары и пирометра. Отсчеты производить с интервалом примерно 50°C по измерениям термопарой. Результаты измерений записать в табл. 1.

6. По достижении температуры примерно 300°C измерения закончить, выключить нагреватель и включить вентилятор для полного охлаждения установки.

3. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений вычислить температуру в кельвинах (К), результаты записать в табл. 1.

2. Построить на миллиметровой бумаге зависимость радиационной температуры от температуры T термопары.

Температуры выразить в К. Масштабы по осям должны быть одинаковыми. Начало графика – при $T = 0$ К. По горизонтальной оси отложить температуру термопары. Результаты измерений для черной (T_{r1}) и светлой (T_{r2}) сторон отметить на графике отчетливыми, различными значками.

3. Провести на графике через начало координат прямую линию под углом 45° . Отклонения результатов измерений от этой линии характеризуют отличие измеренных радиационных температур от истинной температуры T . Сделать выводы.

4. По результатам измерений T и T_{r2} для светлой стороны при высоких температурах (см. табл.1) вычислить по формуле (16) коэффициент черноты a_T .

В формуле (16): T – температура термопары, $T_r = T_{r2}$, $T_0 = 295$ К.

Результаты расчета a_T при двух значениях температуры и их среднее записать в табл. 2.

Результат вычисления a_T

Таблица 2

T , К	T_{r2} , К	a_T	Среднее a_T

5. Подготовить табл. 3.

Температура T_2 светлой стороны

Таблица 3

T , К	T_{r2} , К	T_2 , К

Примечание. В таблице должно быть 10 строк.

6. Из табл. 1 записать в табл. 3 значения T и T_{r2} .

7. Используя результаты измерения радиационной температуры T_{r2} и определенного выше среднего значения a_T (см. табл. 2), вычислить температуру T_2 светлой стороны по формуле (см. (17))

$$T_2^4 = \frac{T_{r2}^4}{a_T} - T_0^4 \left(\frac{1}{a_T} - 1 \right)$$

Результаты расчета записать в табл. 3.

8. По результатам табл. 3 построить графическую зависимость T_2 от T . Оформлять график так же, как и первый график. Через начало координат провести прямую линию под углом 45° . Сделать выводы.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое тепловое излучение? Чем оно отличается от люминесценции?
2. Что такое энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости? Какая связь между ними?
3. Дать определение спектрального коэффициента поглощения.
4. Опишите модель АЧТ.
5. Объясните особенности спектра излучения черного тела.
6. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина.
7. Вычислите поток излучения с единичной поверхности АЧТ при $T = 1000$ К.
8. На какой длине волны при $T = 580$ К спектральная плотность энергетической светимости АЧТ наибольшая?
9. Чем характеризуется серое тело? Сформулируйте закон Стефана-Больцмана для серого тела.
10. Что такое радиационная температура серого тела? Какая связь между радиационной и термодинамической температурами при большой температуре?
11. Опишите устройство и принцип работы радиационного пирометра.
12. В чем состоит эффект Зеебека? Опишите устройство термопары.

Список рекомендуемой литературы

1. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика. М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 496 с.
2. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. Основные законы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 272 с.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М.: Высш. школа, 2000.
4. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3-х т. Т. 3. М.: Наука, 1987.
5. Физическая энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 3. 1992. 672 с., ил. (Статья «Пирометры»).
6. *Бураковский Т., Гизиньский Е., Саля А.* Инфракрасные излучатели. Л.: Энергия, 1978.
7. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978.

Оглавление

Введение

Теоретическая часть

1. Характеристики излучения
2. Законы теплового излучения
3. Излучение реальных тел
4. Оптический термометр
5. Измерение температуры серых тел

Экспериментальная часть

1. Лабораторная установка
2. Измерение температуры пластины оптическим и контактным термометрами
3. Обработка результатов измерений

Контрольные вопросы и задания

Список рекомендуемой литературы