

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.317.2

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ИК ПИРОМЕТРИИ

© 2009 г. Е. К. Галанов, доктор техн. наук; М. К. Филатов

Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург

E-mail: dou@pgups.edu

Исследовано влияние ряда методических и метрологических факторов на точность измерения температуры поверхностей методами инфракрасной пирометрии. Показано, что при измерении температуры металлических шероховатых поверхностей коэффициент излучательной способности образцов следует считать эффективным, так как он зависит от температуры окружающей среды и апертуры пирометра. Рассмотрено влияние на точность измерений поглощения инфракрасного излучения атмосферой.

Коды OCIS: 110.0100.

Поступила в редакцию 05.12.2008.

### Введение

Инфракрасные пирометрические методы находят широкое применение при измерении температуры поверхностей зданий, сооружений, электротехнических, электромеханических и механических узлов и деталей [1, 2]. Эти бесконтактные методы эффективны при контроле температур от  $-30^\circ$  до  $+600^\circ\text{C}$ . Они могут быть применены для контроля труднодоступных поверхностей, элементов и деталей, находящихся под высоким напряжением, при исследовании быстропротекающих процессов и движущихся объектов.

Расширение сферы применения инфракрасных (ИК) пирометров связано с решением некоторых методических и метрологических вопросов. Точность измерения температуры поверхности объекта зависит от алгоритма, заложенного в основе обработки результатов измерений (инфракрасного потока излучения исследуемого объекта), вводимых констант, основной из которых является излучательная способность объекта, в случае измерения на больших расстояниях ( $l \geq 2$  м) – от контроля поглощения ИК излучения атмосферой.

Рассмотрим некоторые из перечисленных факторов, влияющих на точность измерений.

### Влияние спектральных характеристик ИК излучения

ИК область спектра, в которой измеряется поток излучения, ограничена оптикой прибора и спектральной чувствительностью фотоприемника. Для ИК

пирометров типа ST 25, ST 60, ПРЦ-М рабочая область спектра прибора ограничена диапазоном 8–14 мкм, 3–14 мкм, и, следовательно, для определения температуры поверхности тела необходимо произвести интегрирование потока излучения, регистрируемого пирометром, в соответствующей области спектра

$$R_{\nu_1-\nu_2, T} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} K_\nu S_\nu \epsilon_\nu \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1} d\nu, \quad (1)$$

где  $\epsilon_\nu$  – излучательная способность исследуемого объекта,  $K_\nu$  и  $S_\nu$  – спектральное пропускание прибора и чувствительность фотоприемника,  $h$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\nu$  – частота электромагнитного излучения,  $T$  – температура объекта.

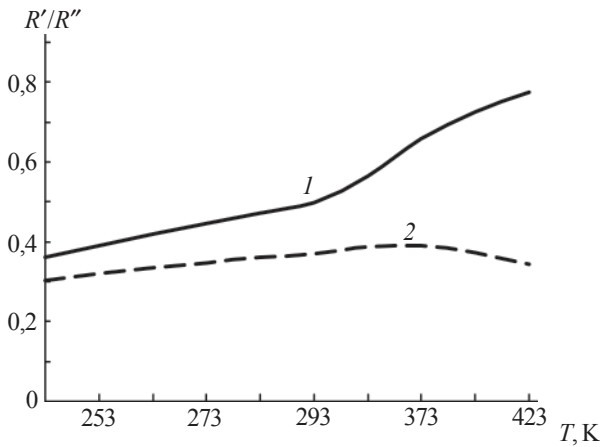
Нахождение температуры исследуемого объекта на основании (1) более затруднительно по сравнению с подобным соотношением для пределов интегрирования  $\nu = 0$  до  $\infty$  (при  $K_\nu = 1$ ,  $S_\nu = 1$ ,  $\epsilon = 1$ )

$$R_{0-\infty, T} = \sigma T^4, \quad (2)$$

$\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана.

Портативные ИК пирометры, получившие наиболее широкое применение, имеют автономное питание и ограниченный ресурс в части математической обработки результатов измерений.

Рассмотрим расхождение показаний измерений в случае, когда в алгоритм обработки результатов измерений  $R_{\nu_1-\nu_2, T}$  положены соотношения (1) и (2) (считаем  $\epsilon = 1$ ,  $K_\nu = 1$ ,  $S_\nu = 1$ ). При сопоставлении результатов вычислений по формулам (1) –  $R'$  и (2) –  $R''$  важно изменение отношения величин ( $R'/R''$ ) в ши-



**Рис. 1.** Отношение потоков излучения  $R'$  абсолютно черного тела в области  $1 - \nu_1 - \nu_2$  и в области  $2 - \nu$  от 0 до  $\infty$ . I – область I ограничена интервалом  $\lambda = 8-14$  микрон, II – область I ограничена интервалом  $\lambda = 3-14$  микрон.

роком температурном диапазоне. На рис. 1 представлены эти величины. Как видно из рис. 1, в диапазоне температур 243–473 К отношение величин ( $R'/R''$ ) изменяется на 100%, когда в  $R'$  учитывается область спектра  $\lambda = 3-14$  мкм, и на 30% при  $\lambda = 8-14$  мкм.

Для наиболее точного определения поверхностной температуры объекта методом ИК пирометрии необходимо проводить расчеты исходя из соотношения (1), с учетом спектрального пропускания прибора и спектральной чувствительности фотоприемника пирометра.

### Влияние шероховатости поверхности объекта на точность пирометрических измерений

Шероховатость исследуемой поверхности может стать вторым источником погрешности измерений. Для многих материалов (металлов, полупроводников и диэлектриков) коэффициенты излучательной способности известны из литературы [1]. Наибольшие трудности возникают при задании излучательной способности металлов. Если в случае большинства диэлектриков коэффициент излучательной способности как спектральный, так и интегральный близки к единице (0,8–0,95) и практически не зависят от качества обработки излучающей поверхности, то в случае металлов влияние этого фактора велико. Для поверхности любого металла коэффициент излучательной способности  $\epsilon$  изменяется в пределах 0,04–0,4 [1, 2]. Наименьшее значение  $\epsilon$  имеют полированные поверхности, и оно возрастает с увеличением шероховатости поверхности.

Истинная излучающая способность материалов (в том числе металлов) определяется их оптическими постоянными

$$\epsilon_\lambda = A_\lambda = 1 - R_\lambda. \quad (3)$$

Пропускание ИК излучения образцом считаем равным нулю.

$$A_\lambda = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_0}, \quad R_\lambda = \frac{(n-1)^2 - k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (4)$$

$n$  и  $k$  – показатели преломления и поглощения исследуемого образца [3].

Из выражений (3) и (4) следует

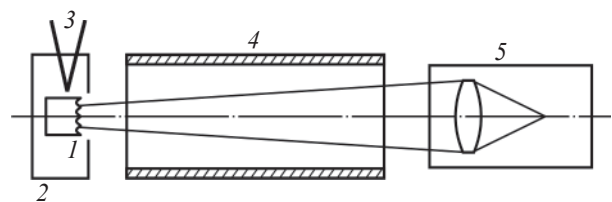
$$\epsilon = 1 - \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (5)$$

Так как у металлов коэффициент отражения в ИК области спектра ( $\lambda = 3-14$  мкм) находится в пределах 0,85–0,95, то коэффициент излучательной способности должен быть равен 0,15–0,05. Отличие  $\epsilon$  от расчетных значений по (5) является приборно-методическим фактором, связанным с отражением шероховатой поверхностью образца излучения окружающих объектов, которое после отражения от металлического образца попадает в объектив ИК пирометра.

Для того, чтобы оценить влияние этих отраженных лучей, которые не характеризуют излучательную способность поверхности металлического образца, но влияют на поток излучения, попадающего на фотоприемник пирометра, были проведены измерения по схеме, представленной на рис. 2.

Исследуемый образец 1, изготовленный из нержавеющей стали, имел шероховатую поверхность (микрошероховатости  $\approx 100$  мкм). Металлический экран 4 охлаждался. ИК пирометр имел температуру окружающей среды.

В таблице представлены результаты измерений коэффициента излучательной способности стальной пластины, определенные с помощью ИК пирометра ST 60. Образец находился в термостате 2 (погреш-



**Рис. 2.** Схема измерительной установки. 1 – цилиндрический образец, 2 – термостат, 3 – термопара, 4 – экран, 5 – ИК пирометр.

Коэффициент излучательной способности  $\epsilon$  образца из нержавеющей стали с шероховатой поверхностью (см. рис. 2)

Температура образца $T$ К	Температура экрана $T$ К	$\epsilon$
353	293	0,34
353	195	0,11
353	77	0,06
373	293	0,34
373	195	0,10
373	77	0,05

ность термостатирования  $0,5$  °С), и его температура контролировалась термопарой 3. Охлаждение экрана 4 осуществлялось с помощью сухого льда (твердый  $\text{CO}_2$ ) и жидкого азота (экран устанавливался в схему на 5–6 с в процессе измерения).

При измерениях в ИК пирометре ST 60 выставлялся коэффициент излучательной способности образца таким, чтобы показания прибора соответствовали истинной температуре образца. Как видно из таблицы, при охлаждении экрана 4 коэффициент излучательной способности шероховатого образца (его можно назвать эффективным коэффициентом  $\epsilon_{\text{эф}}$ ) из стали приближается к коэффициенту излучательной способности полированного образца  $\epsilon \approx 0,04$  [2].

Необходимо отметить, что при задании  $\epsilon$  с погрешностью  $0,01$  (при измерении температуры объекта с помощью ИК пирометра в пределах от  $-30$  до  $+600$  °С) погрешность измерений может достигать  $1$  °С.

Таким образом, исследования показывают, что на результаты пирометрических измерений температуры металлических поверхностей влияет качество обработки поверхности образца и апертура ИК пирометра. Коэффициент излучательной способности образцов, определенный по такой схеме, следует считать эффективным  $\epsilon_{\text{эф}}$ , отличным от истинного коэффициента излучательной способности.

### Влияние атмосферы на пирометрические измерения

На пирометрические измерения при расстояниях до исследуемого образца  $l \geq 2$  м оказывает влияние поглощение излучения в рабочей области спектра атмосферной водой (это влияние особенно существенно при большой разности температур исследуемого образца и атмосферы) [4–7].

В ИК области спектра 3–14 мкм наиболее сильной атмосферной полосой является колебательно-вращательная полоса воды в области деформационных колебаний  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\lambda = 5,2\text{--}7,3$  мкм) [4].

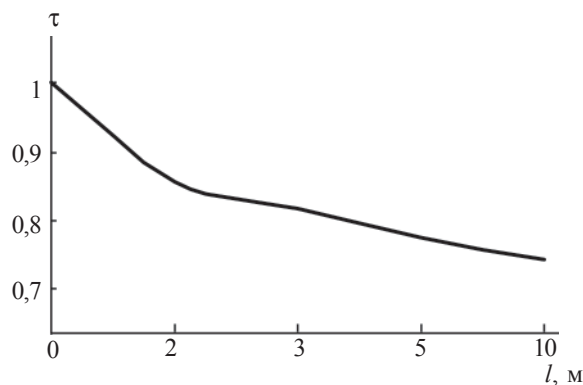


Рис. 3. Интегральное пропускание атмосферы (влажность 60%) ИК излучения абсолютно черного тела ( $T = 373$  К) в области спектра  $\lambda = 3\text{--}14$  микрон.

Интегральный коэффициент поглощения атмосферной водой при влажности 60% в области спектра  $\lambda = 5,2\text{--}7,3$  мкм равен  $\alpha = 0,4$  м. Поток излучения абсолютно черного тела, прошедший расстояние  $l$  (атмосфера имеет влажность 60%) равен

$$R_{\nu_1-\nu_2, T} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1} d\nu + \int_{\nu_1'}^{\nu_2'} \exp^{-\alpha l} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1} d\nu + \int_{\nu_1''}^{\nu_2''} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1} d\nu. \quad (6)$$

Область спектра  $\nu_1'-\nu_1''$  соответствует полосе атмосферной воды ( $\lambda = 5,2\text{--}7,3$  мкм).

На рис. 3 представлены данные расчета интегрального пропускания ( $\tau$ ) атмосферой при влажности 60% ИК излучения абсолютно черного тела ( $T = 373$  К) в области спектра 3–14 мкм. Как видно из рис. 3, уже при расстояниях  $l = 2$  м интегральное поглощение составляет 15%, что может приводить к ошибке определения температуры поверхности объекта в 10 К.

### Выводы

Показано, что для достижения точности измерения температуры поверхности объектов в 1 К методами инфракрасной пирометрии необходимо в алгоритме обработки результатов измерений ИК потока излучения учитывать спектральные характеристики оптических элементов пирометра и пропускание атмосферы. На точность измерения температуры

металлических шероховатых поверхностей влияет апертура ИК пирометра и температура окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Левитин И.Б.* Инфракрасная техника. Л.: Энергия, 1973. 156 с.
2. *Галанов Е.К., Корнух А.В.* Контроль температуры электротехнических, электромеханических и механических элементов и узлов методами инфракрасной пирометрии // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2005. № 2. С. 50–54.
3. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.К.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 350 с.
4. *Быков А.Д., Макушкин Ю.С., Улеников О.Н.* Колебательно-вращательная спектроскопия водяного пара. Новосибирск. Наука, Сиб. отд. 1989. 370 с.
5. *Галанов Е.К.* Дифференциальный инфракрасный фотометр для контроля CO<sub>2</sub> в атмосфере // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 3. С. 63–65.
6. *Маркин В.А.* Порог чувствительности инфракрасных приборов, построенных на матричных фотоприемниках // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 11. С. 51–57.
7. *Шитунов А.Г., Семашкин Е.Н., Черноусов А.А., Громов А.Н., Романов А.Р., Воробьев В.В., Матюшкин А.Ю.* Экспериментальные исследования дальности действия и всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 61–65.