

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЕГО ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

А. В. Фрунзе

Предложен новый алгоритм определения действительной температуры объекта по измеренной пирометром его яркостной или радиационной температуре с учетом температурной зависимости его излучательной способности. Связь, полученная между действительной температурой и яркостной (или радиационной), и скорректированная по излучательной способности объекта, используется далее для нахождения действительной температуры объекта, при этом температурная зависимость излучательной способности оказывается учтенной.

Ключевые слова: пирометры, температура, излучательная способность, коэффициент излучения, зависимость излучательной способности от температуры, зависимость коэффициента излучения от температуры, яркостная температура, радиационная температура.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на измерение температуры объектов энергетическими пирометрами существенное влияние оказывает излучательная способность измеряемого объекта. Излучательная способность реальных объектов всегда меньше 1, поэтому при измерениях энергетическими пирометрами результаты оказываются всегда заниженными. Для компенсации этого занижения в пирометр вводят коэффициент излучения (коэффициент черноты, коэффициент серости, корректирующий коэффициент и т. п.), т. е. коэффициент, связанный с излучательной способностью измеряемого объекта. Используя его, пирометр определяет действительную температуру по измеренной яркостной или радиационной.

Однако коэффициент излучения не является константой для большинства реальных объектов. Он зависит не только от материала объекта и от состояния его поверхности, но и от спектрального диапазона пирометра и температуры объекта. Поэтому рекомендации производителей пирометров, сводящиеся к подбору этого коэффициента при какой-либо температуре и к дальнейшему использованию его при измерении температуры конкретного объекта, часто оказываются несостоятельными. Причиной является именно наличие температурной зависимости излучательной способности объекта и как следствие — температурной зависимости связанного с ней коэффициента излучения. Публикаций о том, как находить температуру объекта в таких

условиях, в литературных источниках не обнаружено.

В данной статье описан алгоритм определения температуры объектов энергетическими пирометрами с учетом температурной зависимости коэффициента излучения.

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Наличие температурной зависимости излучательной способности было показано еще Вортингом [1] в его классической работе по измерению излучательной способности вольфрама. В работе [2], где собраны результаты исследований излучательной способности различных ма-

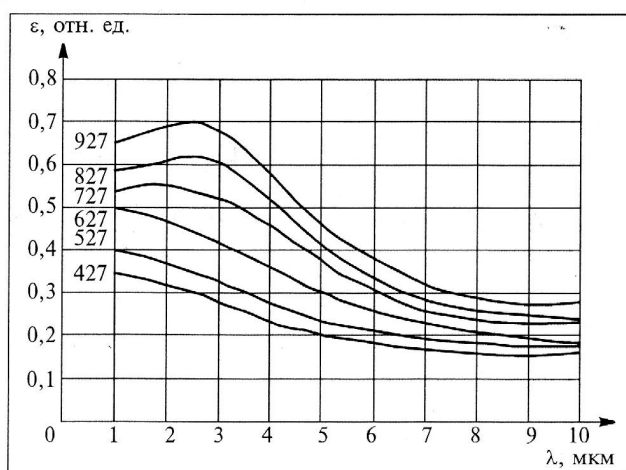


Рис. 1. Спектральная излучательная способность динамной стали

териалов, можно увидеть, что подобная температурная зависимость излучательной способности — это скорее правило, нежели исключение. Однако эти результаты большинству конечных пользователей неизвестны.

На рис. 1 приведены зависимости спектральной излучательной способности динамной стали при нагреве в азото-водородной атмосфере, измеренные в температурном диапазоне от 973 до 1473 К ([3, 4]). Рассмотрим, как при наличии подобных зависимостей энергетическим пирометром можно находить действительную температуру объекта (в данном случае — динамной стали).

НАХОЖДЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как показано в [5], коэффициент излучения определяется соотношением:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda, T) s(\lambda) P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda) P(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

где $\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральная излучательная способность объекта, $s(\lambda)$ — спектральная чувствительность пирометра, λ_{\min} , λ_{\max} — соответственно нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности пирометра, $P(\lambda, T)$ — функция Планка.

Предположим, что измерения проводятся пирометром на основе InGaAs, спектральная чувствительность которого $s(\lambda)$ приведена в [6]. Результаты вычисления коэффициента излучения $\varepsilon(T)$ по уравнению (1) сведены в табл. 1.

Для определения значений $\varepsilon(T)$ при температурах, отличных от приведенных, можно воспользоваться полиномиальной аппроксимацией функции $\varepsilon(T)$:

$$\varepsilon(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + \dots + c_n T^n, \quad (2)$$

где n — порядок полинома, определяемый количеством точек, с использованием которых осу-

Таблица 1
Коэффициенты излучения $\varepsilon(T)$ для пирометра на InGaAs и динамной стали

Температура, °C	700	800	900	1000	1100	1200
$\varepsilon(T)$	0,3330	0,3903	0,4922	0,5544	0,5985	0,6736

ществляется аппроксимация, и точностью аппроксимации; c_0 — c_n — коэффициенты полинома. Расчеты проводятся с применением таких программ, как MathCad, MathLab и т. п.

Поскольку число точек, используемых для аппроксимации, всего шесть, то степень полинома должна быть не выше пятой. Зададим $n = 5$. При этом коэффициенты полинома будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} c_0 &= 6,9587 \cdot 10^1; & c_1 &= -3,5887 \cdot 10^{-1}; \\ c_2 &= 7,3056 \cdot 10^{-4}; & c_3 &= -7,3161 \cdot 10^{-7}; \\ c_4 &= 3,6138 \cdot 10^{-10}; & c_5 &= -7,0501 \cdot 10^{-14}. \end{aligned}$$

По соотношению (2) для $n = 5$ и с коэффициентами c_0 — c_5 можно найти значение $\varepsilon(T)$ для любой температуры в диапазоне от 700 до 1200 °C.

НАХОЖДЕНИЕ ГРАДУИРОВОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПИРОМЕТРА

Для нахождения градуировочной функции пирометра воспользуемся известным соотношением:

$$u(T) = \alpha \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda) P(\lambda, T) d\lambda, \quad (3)$$

где, как и ранее, λ_{\min} , λ_{\max} — нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности пирометра, $P(\lambda, T)$ — функция Планка, $s(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности пирометра, α — нормирующий коэффициент.

Физически коэффициент нормирования представляет собой коэффициент усиления входного каскада пирометра. В данном случае он выбран таким образом, чтобы при измерении температуры 1500 °C выходной сигнал усилителя был равен 1 В.

Рассчитанная градуировочная функция пирометра $u = f(T)$ с приемником на основе InGaAs приведена на рис. 2.

Для дальнейших вычислений необходимо располагать ее аналитическим выражением. В данном случае, когда функция не может быть выражена явно в аналитическом виде, ее также можно аппроксимировать полиномиальной зависимостью (2). Расчет в соответствии с (3) был проведен для температур от 500 до 1500 °C с шагом 50 °C, поэтому для аппроксимации располагаем 14-ю парами значений абсцисс и ординат градуировочной функции. Порядок полинома n

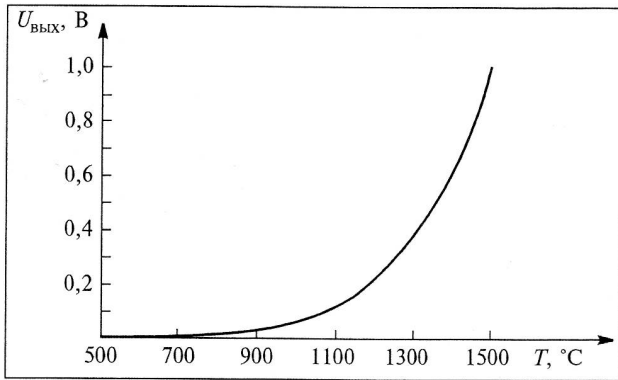


Рис. 2. Градуировочная функция пирометра с приемником на основе InGaAs

может быть выбран вплоть до $n = 13$. Результаты вычислений показали, что для выбранных точек уже при $n = 5$ достигается точность аппроксимации не хуже 0,2 %. Соответствующие этой аппроксимации коэффициенты полинома следующие:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1,1141 \cdot 10^{-1}; & c_1 &= -8,2583 \cdot 10^{-4}; \\ c_2 &= 2,4172 \cdot 10^{-6}; & c_3 &= -3,4366 \cdot 10^{-9}; \\ c_4 &= 2,2419 \cdot 10^{-12}; & c_5 &= -4,0326 \cdot 10^{-16}. \end{aligned}$$

Располагая знанием градуировочной функции, можно легко определить, какой сигнал на выходе входного каскада пирометра соответствует той или иной температуре “модели черного тела” (МЧТ).

Как известно, коэффициент излучения показывает, какая часть от излучения МЧТ, находящегося при равной с объектом температуре, воздействует на приемник пирометра, формируя на его выходе электрический сигнал. Следовательно, при измерении температуры объекта сигнал

на выходе входного каскада пирометра $u_{об}(T_i)$, соответствующий той или иной его температуре T_i , может быть найден как произведение значения градуировочной функции для выбранной температуры на значение коэффициента излучения, соответствующего этой же температуре:

$$u_{об}(T_i) = f(T_i)\varepsilon(T_i). \quad (4)$$

Вычисленные в соответствии с (4) значения $u_{об}(T_i)$ для температур 700; 750; 800; ..., 1150; 1200 °C приведены в табл. 2.

НАХОЖДЕНИЕ ФУНКЦИИ, ОБРАТНОЙ ГРАДУИРОВОЧНОЙ

Зная значения сигналов на выходе входного каскада $u_{об}(T_i)$, получаемые при измерении температуры объекта, можно легко определить, каковы будут показания пирометра, соответствующие этим сигналам. Для этого нужно лишь располагать функцией $T = f^{-1}(u)$, обратной к градуировочной. Если градуировочная функция найдена в виде таблицы, левый столбец которой — абсциссы точек ее графика, а правый — ординаты, то обратная функция может быть найдена простым обменом местами столбцов таблицы (абсциссы станут ординатами и наоборот), отметим, что такой способ нахождения обратной функции справедлив лишь для гладких функций, без особых точек.

Определенная таким образом функция $T = f^{-1}(u)$, обратная к градуировочной для пирометра с приемником на основе InGaAs, приведена на рис. 3.

Также как и для градуировочной функции, необходимо располагать аналитическим выражением для функции $T = f^{-1}(u)$. В данном случае ее придется аппроксимировать полиномиальной зависимостью.

Проведенные вычисления показали, что в данном случае точность аппроксимации не хуже 0,2 % достигается при $n = 9$. Соответствующие этой аппроксимации коэффициенты полинома следующие:

$$\begin{aligned} c_0 &= 5,6392 \cdot 10^2; & c_1 &= 1,8846 \cdot 10^4; \\ c_2 &= -6,0864 \cdot 10^5; & c_3 &= 1,3164 \cdot 10^7; \\ c_4 &= -1,7420 \cdot 10^8; & c_5 &= 1,4195 \cdot 10^9; \\ c_6 &= -7,1045 \cdot 10^9; & c_7 &= 2,1150 \cdot 10^{10}; \\ c_8 &= -3,4178 \cdot 10^{10}; & c_9 &= 2,2973 \cdot 10^1. \end{aligned}$$

Таблица 2
Сигналы на выходе входного каскада $u_{об}(T_i)$ в зависимости от температуры

$T_i, ^\circ\text{C}$	$u_{об}(T_i)$
700	$3,12 \cdot 10^{-3}$
750	$5,28 \cdot 10^{-3}$
800	$9,37 \cdot 10^{-3}$
850	$1,61 \cdot 10^{-2}$
900	$2,60 \cdot 10^{-2}$
950	$3,96 \cdot 10^{-2}$
1000	$5,72 \cdot 10^{-2}$
1050	$8,01 \cdot 10^{-2}$
1100	$1,10 \cdot 10^{-1}$
1150	$1,49 \cdot 10^{-1}$
1200	$2,02 \cdot 10^{-1}$

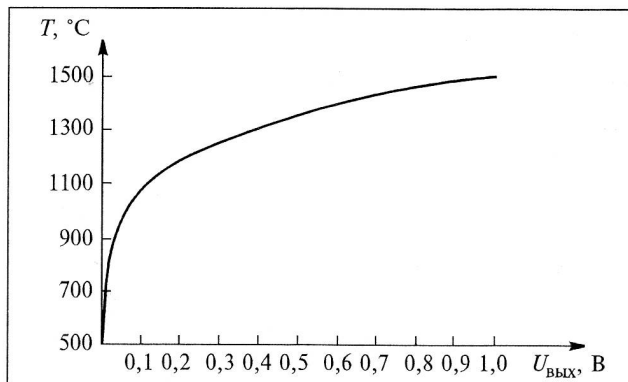


Рис. 3. Функция, обратная к градуировочной

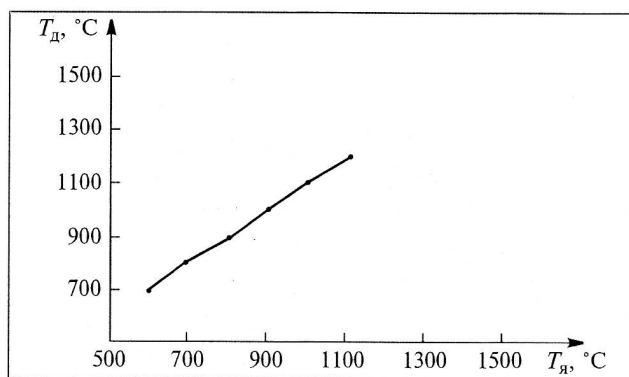


Рис. 4. Зависимость действительной температуры динамной стали от ее яркостной температуры

Вид полинома дается соотношением:

$$T = c_0 + c_1u + c_2u^2 + c_3u^3 + c_4u^4 + c_5u^5 + c_6u^6 + c_7u^7 + c_8u^8 + c_9u^9. \quad (5)$$

Температура, рассчитанная в соответствии с соотношением (5) с использованием в качестве аргумента значений $u_{об}(T_i)$ (см. табл. 2), и будет яркостной температурой объекта (динамной стали) при измерении его температуры пирометром с приемником из InGaAs. Результаты расчета сведены в табл. 3. На основании этих результатов можно найти обратную зависимость — действительной температуры объекта от измеренной пирометром его яркостной температуры. График этой зависимости приведен на рис. 4.

Таким образом, располагая приведенной на рис. 4 зависимостью, можно легко определить

действительную температуру объекта (в нашем случае — динамной стали) с учетом температурной зависимости ее излучательной способности. При этом в пирометр нужно при измерении ввести единичный коэффициент излучения, а далее по данным табл. 3 или рис. 4 найти действительную температуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, литературные данные по температурной зависимости излучательной способности для большинства объектов и материалов отсутствуют. В то же время есть основания полагать, что у многих материалов и объектов излучательная способность есть величина температурозависимая; объектов, где подобной зависимости нет, крайне мало. Поэтому сложившаяся практика измерений энергетическими пирометрами, предполагающая перед измерением ввести в пирометр коэффициент излучения, априори считающийся независимым от температуры, характеризуется принципиальным наличием систематической погрешности, обусловленной ошибкой вводимого в пирометр коэффициента излучения [7].

Предлагаемый в настоящей статье алгоритм определения действительной температуры объекта по измеренной пирометром его яркостной температуре позволяет естественным образом учесть температурную зависимость его излучательной способности. Результаты, аналогичные приведенным на рис. 4, могут быть внесены в память микропроцессора пирометра и тогда отпадает надобность в ручном пересчете яркостной температуры в действительную. Пересчет будет осуществляться микропроцессором, и пользователь сразу будет получать на экране индикатора значение действительной температуры, определенное с учетом температурной зависимости излучательной способности.

Дополнительно отметим, что при таком алгоритме нахождения температуры отсутствует характерное для энергетических пирометров нарушение прослеживаемости к первичному эталону единицы температуры.

Таблица 3

Зависимость яркостной температуры динамной стали от ее действительной температуры

$T_{д}, °C$	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
$T_{я}, °C$	603	646	699	754	808	860	909	958	1008	1059	1115

ЛИТЕРАТУРА

1. *Worthing A. G.* // Phys. Rev. — 1925. — Vol. 25. — P. 846.
2. *Излучательные свойства твердых материалов* / Под ред. Шейндлина А. Е. — М.: Энергия, 1974. — 471 с.
3. *Лисиенко В. Г., Шлеймович Е. М., Ладыгичев М. Г.* и др. Температура: теория, практика, эксперимент: Справочное издание: В 3-х томах. Т. 1, кн. 2. Методы контроля температуры. — М.: Теплотехник, 2009. — 339 с.
4. *Радиационные характеристики объектов контроля температуры в металлургии. Справочник* / А. М. Беленький и др. — М.: МИСиС, 2003. — 29 с.
5. *Свет Д. Я.* Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. — М.: Наука, 1968. — 240 с.
6. *Фрунзе А. В.* Расчетный метод определения температуры спектрального отношения // Измерительная техника. — 2010. — № 6. — С. 39–42.
7. *Фрунзе А. В.* Методические погрешности современных пирометров и способы их минимизации // Метрология. — 2012. — № 7. — С. 25–38.

Александр Виленович Фрунзе — канд. техн. наук, директор ННТП "Термоконт".

☎ (495) 437-32-01

www.pyrometer.ru

□