

ПИРОМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ: ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Металлургам с опытом хорошо известно, что при измерении температуры металлов с помощью пирометров спектрального отношения результаты оказываются завышенными, порой до 10%. О причинах этого завышения и о способах борьбы с ним рассказывается в настоящей статье.

Пирометрией называется наука об измерениях температуры нагретых объектов по их излучению. Соответственно и приборы, определяющие температуру объекта по его излучению, называются пирометрами. Практическая пирометрия возникла на рубеже 19 и 20-го веков. Примерно тогда же и сформировались два основных метода пирометрии: радиационная пирометрия и оптическая пирометрия. Названия эти с течением времени менялись и корректировались, но суть методов осталась неизменной.

Метод радиационной пирометрии использует зависимость энергетической яркости излучения объекта в ограниченном диапазоне длин волн от его температуры. Другими словами, яркость излучения объекта зависит от его температуры. Следовательно, измерив яркость излучения объекта, мы можем измерить (с той или иной точностью) значение температуры объекта. Таким образом, ключевым элементом радиационного пирометра является приемник излучения, преобразующий приходящую на него энергию излучения в иную физическую величину, чаще всего в ток или в напряжение. Его дополняют оптическая система, собирающая в определенном телесном угле излучение от объекта, и электронная схема с системами питания и индикации, усиливающая, преобразовывающая и отображающая результат измерения.

Метод оптической пирометрии первоначально основывался на зависимости спектрального распределения потока излучения нагретого объекта от температуры в диапазоне видимых длин волн. Другими словами, от температуры нагретого объекта зависел цвет его излучения. Объекты, нагретые до 700–800°C, светят темно-оранжевым светом, при 1000–1200°C цвет свечения становится ярко-оранжевым,

постепенно переходя в желтый, при 2000°C цвет воспринимается нашим глазом как ярко-желтый, а после 2500°C свечение приближается к белому цвету.

Долгое время основными элементами цветового сравнения были глаз оператора и нагретая нить накала (или спираль), расположенная в окуляре пирометра в поле зрения оператора. Нить в окуляре совмещалась с изображением измеряемого объекта. Регулируя проходящий через накальную нить электрический ток, оператор подбирал такое его значение, чтобы цвет нити совпадал с цветом измеряемого объекта. При определенном значении тока изображение нити "исчезало" на фоне нагретого объекта, что являлось критерием равенства температуры объекта и нагретой нити. Кстати, отсюда пошло и распространенное в литературе название подобных пирометров – пирометры с исчезающей нитью. Другое название этих пирометров, не менее распространенное – цветовые пирометры.

В силу особенностей человеческого зрения описанный метод при опоре на восприятие цвета человеческим глазом имеет серьезные ограничения в точности и повторяемости результатов измерений. Поэтому с развитием компонентной базы весьма субъективные визуальные измерения были вытеснены измерениями с помощью нескольких приемников излучения, работающих в различных спектральных диапазонах. Таких приемников может быть и три, и семь, но на практике чаще всего ограничиваются двумя. Таким образом, в настоящее время этот метод основан на зависимости от температуры отношения энергетических яркостей объекта в двух различных областях спектра излучения. Соответственно, этот метод получил название метода пирометрии спектрального отношения.

В первой половине 20-го века пирометры с исчезающей нитью были распространены гораздо шире радиационных пирометров. С середины прошлого века наметилась обратная тенденция – после появления радиационного пирометра "Radiamatic" фирмы BRAUN его, как принято сейчас говорить, легальные и нелегальные копии начали вытеснять цветные пирометры. Пожалуй, и сейчас в мире радиационных пирометров используется больше, чем пирометров спектрального отношения, хотя количество последних в нынешнем столетии заметно увеличилось. И радиационные пирометры, и пирометры спектрального отношения имеют как достоинства, так и недостатки, в силу чего ни те, ни другие не в силах вытеснить друг друга с потребительского рынка.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ РАДИАЦИОННЫХ ПИРОМЕТРОВ

Радиационные пирометры проще, чем пирометры спектрального отношения. У последних принципиально должно быть не менее двух приемников, усилителей и преобразователей, в то время как радиационные пирометры довольствуются одним комплектом всех необходимых узлов. Еще одно преимущество радиационных пирометров – более высокая, чем у пирометров спектрального отношения, разрешающая способность. Это "забронировало место" для радиационных пирометров в различных эталонных установках.

Далее, в силу ряда причин радиационные пирометры вне конкуренции при измерении температур ниже 300–400°C, и при работе в узких спектральных диапазонах – например, при контроле температуры стекла, измерении через пламя, и т.д. Трудно также предположить, что в обозримом будущем пирометрами спектрального отношения можно будет измерять температуру алюминия и его сплавов в диапазоне до 500°C.

Сказанное предвещает радиационной пирометрии еще долгие годы жизни. Но, увы, метод радиационной пирометрии обладает рядом "врожденных" существенных недостатков, на которых мы кратко остановимся. Основная проблема радиационной пирометрии – это зависимость результатов измерений от излучательной способности объекта. Чтобы было понятнее, представьте себе два полированных алюми-

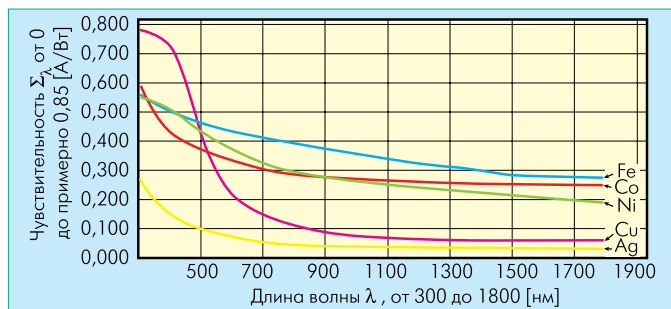


Рис. 1 Зависимость излучательной способности металлов от длины волны λ



Рис. 2 Спектральные характеристики приемника в пирометрах ДИЭЛТЕСТ: синяя кривая – коротковолновая область, красная – длинноволновая

ниевых чайника, один из которых только снят с полки магазина, а другой, изрядно закопченный, более десятка лет ежегодно вывозился в туристские походы и на слеты. Представьте также, что оба они залиты под завязку водой и доведены до кипения. Если мы попробуем измерить температуру стенок этих чайников хорошо настроенным радиационным пирометром, то при измерении закопченного чайника пирометр покажет температуру от 90 до 98 градусов, а при измерении блестящего полированного – от 25 до 35 градусов. При этом вода в них кипит, т.е. температура внутренних поверхностей обеих стенок около 100 градусов.

Парадоксальное на первый взгляд явление объясняется просто. При одной и той же температуре различные тела излучают по-разному – одни сильнее, другие – слабее. В термодинамике принято, что излучательная способность ε идеального излучателя – "абсолютно черного тела" – равна 1, а излучательная способность реальных тел (естественно меньшая, чем у идеального излучателя) лежит в диапазоне от 0,02–0,03 до 0,98–0,99. То есть, если тело излучает вдвое меньше, чем "абсолютно черное тело", то его излучательная способность равна 0,5, если на 20% меньше – то 0,8 и т.д. Излучательная способность стенки закопченного чайника близка к единице, и составляет 0,95–0,96, в то время как у полированного она немногим больше 0,1. Соответственно, полированный излучает почти в 10 раз меньше, чем закопченный, а по результатам измерений радиационного пирометра выходит, что температура полированного чайника заметно ниже 100°C.

Чтобы исправить ситуацию, разработчики радиационных пирометров снабжают свои изделия органом регулировки, который фактически регулирует коэффициент усиления усилителя сигнала приемника. Шкала этого органа регулировки делается, как правило, от 0–0,1 до 1,0. Если вы установили эту регулировку в положение 0,1, то сигнал от приемника дополнительно усилится в 10 раз, если 0,2 – в 5 раз, если 0,67 – в 1,5 раза, и т.д. Таким образом, вам предоставляется возможность получить правильный результат измерений для объектов с любой излучательной способностью – будь она равна любому значению из диапазона от 0,1 до 0,99.

Это замечательное техническое решение – назовем его коррекцией по излучательной способности – имеет один



Рис.3 Переносные пирометры спектрального отношения ДИЭЛТЕСТ-ТЦхП

серьезнейший недостаток. При измерении объекта вы должны довольно точно знать его излучательную способность. В ряде случаев можно требуемую информацию получить из справочников. Но очень часто в них или нет данных на ваш объект, или приведенные данные некорректные (к примеру, справедливы для пирометра, работающего в ином спектральном диапазоне, чем ваш). Так что вместо задачи по измерению температуры объекта перед вами встает задача определения правильного значения коэффициента коррекции. И иногда вторая задача оказывается вовсе не проще первой. Кроме этих радиационные пирометры имеют ряд иных существенных недостатков, их результаты зависят от: расстояния до измеряемого объекта, формы объекта, запыленности и загазованности промежуточной среды, наличия защитных стекол и непрозрачных объектов в поле зрения пирометра, боковых засветок при работе с крупноразмерными объектами, переотражений измеряемым объектом излучения сильно нагретых объектов, расположенных рядом. Как видите, факторов, мешающих получению радиационными пирометрами точных результатов, набирается с десяток. Именно поэтому пользователи все чаще и чаще задумываются об использовании пирометров спектрального отношения, более дорогих, чем радиационные, но свободных от всех вышеперечисленных недостатков.

ДОСТОИНСТВА ПИРОМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Пирометры спектрального отношения определяют температуру объекта по отношению сигналов от двух приемников, работающих на разных длинах волн. Такой принцип измерения температуры позволяет избавиться от всех вышеперечисленных недостатков, свойственных радиационным пирометрам. Зависимость сигнала от расстояния одинакова для обоих приемников пирометра спектрального отношения, поэтому на отношение сигналов она не влияет. Форма измеряемого объекта, запыленность и загазованность промежуточной среды одинаково влияют на сигналы с обоих приемников, оставляя неизменным их отношение. Пирометры спектрального отношения нечувствительны к боковым засветкам от крупноразмерных объектов, наличию небольших непрозрачных объектов в поле зрения пирометра, к наличию защитных стекол, например стекол смотровых окон в вакуумных

камерах. Отношение сигналов по-прежнему остается неизменным. Да и отличие значения ε измеряемого объекта от 1 чаще всего приводит к одинаковому уменьшению сигналов с обоих приемников. Поэтому отношение сигналов слабо зависит от ε , и корректный результат измерения получается без знания ε объекта.

ДВА НЕДОСТАТКА ПИРОМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Во-первых – цена. Пирометр спектрального отношения сложнее радиационного, априори состоит из большего числа элементов, труднее калибруется. Отсюда и более высокие цены на них, за дополнительные узлы и дополнительную работу платить приходится больше.

Во-вторых, как ни прискорбно, но излучательная способность измеряемого объекта ε влияет на результаты измерений. Точнее, результат измерения пирометра спектрального отношения зависит не столько от величины излучательной способности или от ее изменения от объекта к объекту, сколько от спектральной зависимости $\varepsilon = f(\lambda)$. На рис.1 приведены спектральные зависимости излучательной способности ε_λ для 5 металлов: Fe, Ni, Cu, Ag, Co [1]. Отметим, что они характеризуют большинство металлов и их сплавов. Из рисунка видно, что все зависимости имеют однотипный характер – с ростом длины волны спектральная излучательная способность ε_λ снижается. Это приводит к тому, что сигнал длинноволнового приемника пирометра спектрального отношения оказывается заниженным по сравнению с коротковолновым. По этой причине показания пирометра спектрального отношения оказываются завышенными нередко более чем на 10%.

Аналитически рассчитать величину погрешности, вызванной снижением ε_λ , возможно лишь в случае, если полосы пропускания приемников очень узкие, не более 10–12 нм. Однако, в последнее время подавляющее большинство пирометров спектрального отношения использует двухслойные фотодиодные структуры, верхний слой которых обладает максимальной чувствительностью в коротковолновой области спектра, нижний – в длинноволновой. Полосы спектральной чувствительности этих приемников составляют десятки и сотни нанометров, что исключает погрешность, обусловленную непостоянством ε_λ . Добавим к этому, что информация по ε_λ для большинства материалов, которые нужно измерять в промышленности, крайне скудна или вовсе отсутствует [2]. Именно по этим причинам вопрос о коррекции показаний пирометров спектрального отношения при измерении температуры объектов с излучательной способностью, зависящей от длины волны, ранее не был решен. Долгое время пользователи мирились с этим, так как во многих случаях важно не столько точное знание измеряемой температуры, сколько соблюдение ее повторяемости в ходе технологического процесса.

РУЧНАЯ КОРРЕКТИРОВКА И ЕЕ ПРОБЛЕМЫ

Самым простым решением снижения этой погрешности оказалось внедрение в пирометры спектрального отношения дополнительного регулировочного узла, который позволяет корректировать отношение сигналов от приемников излучения примерно до полутора раз как в ту, так и в другую сторону. Таким образом, зная реальную температуру измеряемого объекта, можно "подкрутить ручку" таким образом, чтобы показания пирометра были правильными. Однако работу по определению значений этих корректирующих коэффициентов производители пирометров негласно переложили на плечи пользователей. В то же время информации о том, каково значение этого коэффициента для измеряемых пользователем объектов, в справочной литературе нет. И пользователь, как и раньше, должен снова крутить ручку, но теперь уже у пирометра спектрального отношения, который изначально предполагался свободным от подобных органов корректировки.

Но и это еще не все. Дело в том, что даже если вы нашли значение этого корректирующего коэффициента для измеряемого вами металла при какой-то температуре, то использовать найденный коэффициент при измерении этого же металла, но при других температурах нельзя, т.к. это приведет к ошибочным результатам. Это утверждение иллюстрируют данные таблицы 1 по измерениям меди. Реальная тем-

пература объекта приведена в первой строке таблицы. Во второй приведены показания цветового пирометра при измерении температуры без использования корректирующего коэффициента ($K = 1$). Значения корректирующего коэффициента, необходимые для точного измерения соответствующей температуры, приведены в третьей строке (знак "минус" говорит о том, что корректировка необходима в сторону снижения). Как нетрудно заметить, коэффициенты отличаются друг от друга, причем тот, который соответствует температуре 1200°C , больше коэффициента, соответствующего температуре 600°C , почти на 25%.

Предположим, мы выбрали такое значение корректирующего коэффициента, и пирометр правильно измеряет объект при температуре 900°C . Четвертая строка таблицы показывает, каковы будут показания пирометра при использовании этого коэффициента ($K = -1,4113$) при измерении других температур. Нетрудно заметить, что уже на температурах 800 и 1000°C погрешность измерения при использовании коэффициента, идеально выбранного для 900°C , составляет 2%. При измерении на 1200°C эта погрешность превышает 5%, а на 600°C – 6%. Это конечно меньше 11%-ной погрешности, которая была при измерении объекта при 1200°C нескорректированным пирометром, но о том, что с коэффициентом, подобранным для 900°C , можно получать корректные резуль-

Таблица 1. Погрешности измерений пирометром спектрального отношения с неизменным корректирующим коэффициентом

Температура объекта (Cu) (T, °C)	600	700	800	900	1000	1100	1200
Нескорректированные показания	641	754	870	990	1112	1238	1368
Требуемый корректирующий коэффициент K	-1,2758	-1,3190	-1,3642	-1,4113	-1,4605	-1,5107	-1,5625
Показания при коэффициенте K = -1,4113	561	672	788	900	1019	1141	1266

таты при измерении того же объекта, но при любых других температурах, надо забыть.

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ

Эти два серьезнейших недостатка снижения погрешности измерений цветковых пирометров путем ручной корректировки отношения сигналов побудили разработчиков пирометров ДИЭЛТЕСТ найти другой способ коррекции, свободный от указанных проблем. Он освобождает пользователя от самостоятельного определения коэффициентов, неизвестных ему заранее, и одинаково хорошо корректирует показания во всем диапазоне измерений пирометра. Суть его состоит в следующем. Как упоминалось выше, аналитический учет величины погрешности, вызванной непостоянством ϵ_λ , возможен лишь в том случае, если полосы пропускания приемников не более 10–12 нм. В остальных случаях расчеты могут быть проведены только численными методами.

В то же время, благодаря развитию компьютерной техники и программного обеспечения численные методы интегрирования давно уже перестали быть проблемой. Поэтому численный расчет корректирующего сигнала для приемника с известной спектральной характеристикой и материала с известной зависимостью излучательной способности ϵ_λ от длины волны не сложен. Типичные спектральные характеристики фотоприемника, используемого в пирометрах ДИЭЛТЕСТ-ТЦ, приведены на рис.2. Расчет проводился в следующей последовательности. Вначале определялась градуировочная характеристика пирометра:

$$Q_{\text{мнт}}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(T) \times S_\lambda(\text{корот}) \times d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_\lambda(T) \times S_\lambda(\text{длинн}) \times d\lambda}, \quad (1)$$

где $E_\lambda(T)$ – спектральная плотность энергетической яркости МЧТ*, Вт×м³×ср; S_λ – спектральная чувствительность приемника (коротковолнового или длинноволнового), А/Вт; λ_1 и λ_2 ,

λ_3 и λ_4 – нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности коротковолнового и длинноволнового приемников, соответственно в метрах.

Затем для значений температур от 600°C до 3000°C с шагом 1°C рассчитывалось значение спектрального отношения, получаемое при измерении объекта с выбранной ϵ_λ :

$$Q_{\text{объекта}}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(T) \times S_\lambda(\text{корот}) \times \epsilon_\lambda \times d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_\lambda(T) \times S_\lambda(\text{длинн}) \times \epsilon_\lambda \times d\lambda}. \quad (2)$$

Получаемые при расчете по (2) значения $Q_{\text{объекта}}(T)$ использовались в качестве аргумента при расчете функции, обратной к (1).

КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛОВ В ПИРОМЕТРАХ ДИЭЛТЕСТ

Краткие результаты расчета по формулам (1) и (2) сведены в табл.2. Видно, что для всех ϵ_λ , приведенных на рис.1, величины корректирующих сигналов ведут себя схожим образом. Во всех случаях показания завышены. При этом для Fe, Ni и особенно Co, характеризующихся не очень крутым спадом ϵ_λ с ростом λ , завышения на 1600°C не превышают 161°C. В то же время для Ag, а для Cu особенно, величины завышений значений увеличиваются в 2 раза. Это обусловлено более сильным ослаблением сигнала длинноволнового приемника для Ag и Cu. Знание величины корректирующих сигналов позволяет вводить программную коррекцию в пирометр спектрального отношения при работе с металлами.

Указанный метод коррекции показаний при измерении температуры металлических тел введен в пирометры серии ДИЭЛТЕСТ. Для экспресс-контроля в металлургии и машиностроении используются переносные приборы ДИЭЛТЕСТ-ТЦхП (рис.3). Однако во многих технологических процессах

Таблица 2. Поправки, необходимые для пирометров спектрального отношения ДИЭЛТЕСТ при измерении Fe, Ni, Cu, Ag, Co

Температура объекта T, °C	Температурные поправки				
	Fe	Ni	Cu	Ag	Co
600	+35	+39	+41	+24	+11
800	+51	+57	+70	+41	+17
1000	+70	+78	+112	+64	+24
1200	+92	+102	+168	+93	+34
1400	+116	+130	+241	+128	+44
1600	+143	+161	+332	+172	+57
1800	+172	+196	+444	+224	+72
2000	+203	+235	+581	+285	+89
2200	+236	+278	+744	+358	+109
2400	+272	+326	-	+441	+132
2600	+310	+378	-	-	+157
2800	-*	-	-	-	+186

* Пирометр зашкаливает, показания превышают 3000°

*МЧТ – макет черного тела, техническая реализация идеализированного понятия "абсолютно черное тело" (Прим. редактора).

необходимо непрерывно контролировать температуру объектов в течение нескольких часов или даже суток. Это изменение температуры металлов при плавке и заготовок при литье, контроль температуры проката на станах, деталей в процессе термообработки, измерения температуры реагентов и катализаторов в химических реакторах. Для решения подобных задач применяют стационарные пирометры ДИЭЛТЕСТ-ТЦхСу. Их основным отличием от переносных является наличие аналогового выхода (например, токового выхода 0...20 мА), соединяемого со входом регистрирующего самописца (рис.4). Иногда такие пирометры включают в контур управления процессом, и в этом случае сигнал с аналогового выхода используется не только для регистрации, но и для регулирования температуры объекта.

Для ряда материалов, в том числе высоколегированных сталей, была исследована зависимость ϵ_λ от λ . Оказалось, что для приборов серии ДИЭЛТЕСТ-ТЦ можно подобрать универсальную корректирующую кривую, подходящую как для чистого железа и высоколегированных сталей, так и для ряда других металлов (никель, кобальт и т.п.). При этом для большинства этих металлов коррекция возможна до уровня, при котором погрешность измерений в диапазоне температур от 600 до 2400°C составляет всего 1–1,5% (для кобальта – до 2%). Коррекция показаний осуществляется переводом в



Рис.4 Стационарные пирометры спектрального отношения ДИЭЛТЕСТ-ТЦ

положение "ВКЛ" тумблера коррекции, установленного на задней панели прибора (см. рис.4). Указанный способ коррекции не только сохраняет все преимущества, которыми обладают пирометры спектрального отношения, но и избавляет пользователя от необходимости вводить в прибор корректирующий коэффициент, значение которого ему неизвестно, и заменяет механическую подстройку. Поэтому измерения температуры многих металлов выполняются без роста погрешности во всем диапазоне измеряемых температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Т.1. –М.: Наука, 1964.
2. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под ред. Шейндлина А.Е. –М.: Энергия, 1974.