



# ВЛИЯНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПИРОМЕТРОВ НА ВЫБОР ПРИБОРА\*

А.Фрунзе, к.т.н.

Пирометрические измерения в металлургии сопровождается большое количество систематических погрешностей. В статье обоснованно утверждается, что ради повышения качества продукции не надо приобретать пирометр, который одновременно может измерять и высокие, и низкие температуры.

**К**ак уже было отмечено в начале статьи, пирометрия как отрасль измерительной техники характеризуется очень большим количеством систематических погрешностей – как инструментальных, так и методических. В отличие от инструментальных, методические погрешности возникают вне зависимости от того, насколько хорошо калиброваны средства измерений. Их нельзя исключить просто покупкой прибора с лучшими метрологическими характеристиками, без изменений методики измерений. Методические погрешности в пирометрии являются следствием того, что сигналы, вырабатываемые приемниками излучения пирометров, определяются не только температурой измеряемой поверхности, но и ее излучательной способностью. Рассмотрим следующие методические погрешности, возникающие при пирометрических измерениях.

## МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗ-ЗА ЗАВИСИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПИРОМЕТРОМ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИЗМЕРЯЕМОГО ОБЪЕКТА

В энергетических пирометрах с нефокусируемой оптикой при изменении расстояния

между объектом и пирометром поток, проходящий на приемник пирометра, изменяется от 10-20% (при удалении) до 1,5-2 раз (при приближении), притом что температура измеряемого объекта неизменна. Причина заключается в том, что с изменением расстояния происходит несинхронное уменьшение телесного угла (под которым из каждой точки объекта видна входная линза объектива пирометра) и увеличение площади объекта (попадающей в поле зрения пирометра). Сложная форма функциональной зависимости диаметра поля зрения пирометра от расстояния между пирометром и объектом не позволяет провести теоретический анализ этой погрешности.

Качественный анализ зависимости диаметра поля зрения от расстояния между объектом и пирометром позволяет сделать вывод, что упомянутая методическая погрешность в области за "перетяжкой" будет минимальной для пирометров с короткофокусными объективами. Однако использование таких пирометров часто затрудняет тот факт, что у подобных приборов диаметр поля зрения очень быстро увеличивается с ростом расстояния. И эти приборы зачастую требуют, чтобы уже на расстоянии 2-3 м измеряемый объект имел размеры от полуметра до метра.

\* Продолжение. Начало см.: Фотоника, 2012, №3, с. 46-51.



Рис.1. Пирометр ДИЭЛТЕСТ-ТВ2П2

Эффективным способом исключения рассматриваемой систематической погрешности является использование пирометров с объективом, позволяющим фокусировать на приемник излучения изображение измеряемого объекта, снабженным соответствующим образом подобранной полевой диафрагмой [6]. Однако такая фокусировка есть в основном только у узкополосных пирометров, работающих в видимой и ближней ИК-области, поскольку при этом возможно использовать имеющие механизм фокусировки фотографические объективы. Механизмы фокусировки в пирометрах, работающих в диапазоне от 2-7 до 12-14 мкм, обычно отсутствуют.

Также надо отметить, что варьирование приходящего на приемник энергетического



Рис.2. Пирометр ДИЭЛТЕСТ-ТН5С2

потока, связанное с изменением расстояния, по-разному воздействует на узкополосные и на широкополосные пирометры. В узкополосном пирометре изменение сигнала с выхода приемника в рабочем диапазоне измеряемых температур может достигать 5-6 порядков. Например, в снабженных кремниевым фотодиодом пирометрах ДИЭЛТЕСТ-ТВхх (рис.1 и 2) при изменении температуры от 500 до 1800°C выходной ток приемника изменяется примерно от 50 пА до 50 мкА. В пирометрах ДИЭЛТЕСТ-ТН5х с фотодиодом на основе InGaAs выходной ток приемника изменяется также на 6 порядков - от 1-2 нА до 1-2 мА. В то же время в пирометре ДИЭЛТЕСТ-ТН3х, выполненном на основе термоэлемента и работающем в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм,



изменение измеряемой температуры в пределах рабочего диапазона вызывает изменение сигнала от 1 нВ до 10 мкВ, то есть на четыре порядка. Поскольку крутизна преобразования этого прибора на два порядка ниже, чем у пирометров на основе фотодиодов, то и изменение потока, связанное с варьированием расстояния до объекта, влияет на него сильнее.

### МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗ-ЗА ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ПИРОМЕТРА С ТЕРМИЧЕСКИМ ПРИЕМНИКОМ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ПИРОМЕТРА И/ИЛИ ПРИЕМНИКА

Как следует из названия раздела, рассматриваемая методическая погрешность возникает только в энергетических пирометрах с термическими приемниками излучения (термобатареями, болометрами, пироэлектрическими приемниками, элементами Голэя). Пирометры с фотоэлектрическими приемниками излучения от этой методической погрешности свободны.

Как показано, например, в [6], сигнал  $E$  на выходе радиационного пирометра (равно как и пирометра частичного излучения с термоэлементом) определяется соотношением

$$E = M \cdot (1 - r) \cdot (F_1 \cdot T_1^4 - F_3 \cdot T_3^4), \quad (15)$$

где  $F_1$ ,  $F_3$  – коэффициенты, определяемые поглощением линз объектива,  $r$  – коэффициент отражения от линз,  $T_1$  – температура измеряемого объекта,  $T_3$  – температура окружающей среды.

Коэффициент  $M$ , как показано там же, сложным образом зависит от термоЭДС каждого из составных элементов приемника, теплового сопротивления перехода "чувствительный элемент – корпус приемника", температуры корпуса приемника и температуры чувствительного элемента (в общем случае они неодинаковы).

Приведенное соотношение показывает, что сигнал на выходе пирометра с термоэлектрическим приемником зависит не только от температуры измеряемого объекта, но и от температуры чувствительного элемента приемника.

Если при изготовлении приемника чувствительный элемент тщательно теплоизолировать

от его корпуса, то приемник окажется крайне инерционным вследствие плохого теплосброса энергии, нагревшей чувствительный элемент. Поэтому обычно тепловое сопротивление перехода "чувствительный элемент – корпус приемника" стараются сделать минимальным для лучшего теплосброса. Поэтому в (15)  $T_3$  можно считать температурой корпуса приемника.

Для минимизации рассматриваемой методической погрешности в пирометрах с термоэлектрическими приемниками необходимо вводить соответствующую поправку, корректирующую изменение сигнала на выходе пирометра в зависимости от температуры корпуса приемника. В [5] описаны способы такой коррекции при помощи аналоговой схемотехники. С развитием микропроцессорной техники подобную коррекцию осуществляют цифровым способом. Для этого тем или иным методом измеряют температуру корпуса приемника излучения, и далее осуществляют коррекцию в соответствии со следующим алгоритмом:

$$E = \alpha \cdot (F_1 \cdot T_1^4 + F_0 \cdot T_0^4 - F_k \cdot T_k^4), \quad (16)$$

где  $\alpha = M \cdot (1 - r)$ ,  $T_0$  – температура окружающей среды в момент проведения измерений,  $T_k$  – температура окружающей среды в момент калибровки,  $F_0$  и  $F_k$  – поглощение линз объектива, соответствующее температурам  $T_0$  и  $T_k$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели пять основных источников методических погрешностей, возникающих при измерениях температуры объектов энергетическими пирометрами. За пределами анализа остались методические погрешности за счет поглощения излучения средой, находящейся между пирометром и объектом, и погрешности за счет виньетирования (заслонения) части поверхности объекта элементами конструкций, которые по различным причинам не могут быть удалены из поля зрения, и ряд некоторых других.

Еще один тип методической погрешности, который остался не рассмотренным, – погрешность за счет маскирования части поверхности объекта объектом с иной температурой. Примером этого может служить лист металла на



прокатном стане, частично покрытый шлаком. Такая методическая погрешность разумными средствами не может быть скорректирована, поэтому в данном случае просто необходимо использовать узконаправленные пирометры с беспараллаксной системой визирования, поле зрения которых заметно меньше площади незашлакованной поверхности, и точно наводить пирометр на незашлакованную часть поверхности измеряемого объекта.

Приведенный материал подводит к следующим выводам.

- Измерение температуры пирометрами – очень сложный вид измерений, сопровождаемый большим количеством методических погрешностей. Как правило, суммарная погрешность измерения в разы, а то и более чем на порядок превосходит инструментальную погрешность прибора. Сегодня уже не редкость пирометры с инструментальной погрешностью 0,3% и ниже. В то же время 10%-ная погрешность в определении  $\epsilon$  запросто приводит к появлению почти 5-10%-ной погрешности в измерении температуры, в 20-30(!) раз большей, чем инструментальная. А пользователь очень часто вообще ничего не знает о значении  $\epsilon$  измеряемого объекта. Какие тут 10%, ошибка может составить и 20%, и 30%! А если  $\epsilon$  малое, в пределах 0,2-0,25, то рядовая для практики погрешность  $\Delta\epsilon_t = 0,1$  составит не 20, а 40-50%! И соотношение (10), выведенное в предположении, что  $\Delta\epsilon_t \ll \epsilon_t^u$ , даст значение погрешности не 0,25, а почти 0,5 от  $\frac{\Delta\epsilon_t}{\epsilon_n^u}$ .

Поэтому в корне ошибочно представление о том, что для повышения точности измерений

достаточно лишь выбрать пирометр с минимальным значением заявленной погрешности. Нужно выбирать пирометры, характеризующиеся минимальными в условиях пользователя методическими погрешностями, а уже из них выбирать тот, который приемлем и по цене, и по величине инструментальной погрешности.

- Проведенный анализ показывает, что минимизация рассмотренных выше методических погрешностей достигается использованием пирометров, работающих в коротковолновой части спектра. Это обусловлено тем, что крутизна преобразования температура-сигнал резко возрастает с уменьшением длины волны теплового излучения. Пирометры, чувствительные в спектральном диапазоне от 0,6 до 0,7 мкм, позволяют уверенно измерять температуру объектов, нагретых выше 900-1000°C. Пирометры со спектральным диапазоном от 0,9 до 1,05 мкм допускают понижение границы измерений до 500°C. Чувствительные в диапазоне от 0,9 до 1,6 мкм пирометры позволяют измерять температуру вплоть до 200-250°C.

Однако со снижением нижней границы диапазона измеряемых температур растут и присутствующие пирометрам методические погрешности. Поэтому не надо пытаться приобретать прибор, который одновременно может измерять и высокие, и низкие температуры. Измерить-то он измерит, но вот с какими погрешностями? Эти погрешности могут оказаться в разы больше, чем собственная инструментальная погрешность пирометра, заявляемая производителем. И оценить эту методическую погрешность пользователю обычно не по силам. Поэтому для минимизации перечисленных методических



погрешностей нужно всегда стремиться использовать как можно более коротковолновые пирометры.

• А как же пирометры, работающие в спектральном диапазоне от 2–6 до 12–14 мкм? От них что, вообще отказаться? Ни в коем случае! Такие пирометры абсолютно незаменимы при измерении температуры объекта от отрицательной до 150–250°C. В этом диапазоне температур нет не только ничего лучшего, чем они, но и вообще ничего кроме них. И в ближайшем будущем, скорее всего, ничего другого не будет. Поэтому использование пирометров со спектральным диапазоном от 2–6 до 12–14 мкм абсолютно безальтернативно для измерения низких температур, не выше 250°C. В остальных же случаях надо использовать коротковолновые пирометры видимого и ближнего ИК-диапазона.

• Как было неоднократно отмечено, измерения температуры при помощи пирометров характеризуются очень большим количеством методических погрешностей. С целью их исключения необходимо, чтобы измерения

производились в строгом соответствии с методиками, которые в каждом конкретном случае должны быть разработаны специалистами-метрологами, хорошо знакомыми с пирометрией. Бытующее на многих предприятиях мнение, что был бы прибор, а уж измерить-то им температуру мы всегда сможем, сегодня уже неприемлемо. Если мы хотим в результате измерения не просто получить какую-то цифру, а знать, к примеру, что с вероятностью 95% измеряемая температура лежит в таком-то интервале, нужны грамотные методики измерений, нужны их аттестация и точное соблюдение этих методик в процессе измерений. В противном случае будет, как сказал известный классик из недавнего прошлого: "Хотели как лучше, а получилось как всегда".

#### ЛИТЕРАТУРА

5. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике: Справочник /Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980.
6. **Гаррисон Т.Р.** Радиационная пирометрия. – М.: Мир, 1964.