

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПИРОМЕТРИИ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.А. Галенко, М.О. Сысоева

В статье проанализировано влияние неизотермичности дисперсных сред и флуктуаций их яркости на результаты пирометрии. Рассмотрено влияние рассеяния на спектр излучения. Отмечена необходимость учета влияния перечисленных факторов путем создания математической модели.

При экспериментальных исследованиях дисперсных (мутных) сред необходимо обеспечить переход от измеренных температур (яркостной, цветовой) к средней массовой, так как именно она используется в термодинамических расчетах. Затруднения при таком переходе создают следующие факторы: а) отличие спектра излучения дисперсной среды от спектра абсолютно черного тела, б) флуктуации яркости излучения в результате флуктуаций концентрации и средней температуры частиц, попавших в «поле зрения» пирометра, в) неизотермичность дисперсной среды.

Рассмотрим влияние этих факторов на результат измерения и некоторые способы учета этого влияния.

Как правило, каждый метод пирометрии предполагает знание величины коэффициента излучения ε исследуемого объекта или определение вида зависимости этого коэффициента от длины волны λ [1]. Для корректного применения метода пирометрии спектрального отношения достаточно подтверждения «серости» исследуемого объекта, то есть подобия его спектра спектру абсолютно черного тела. При диагностике дисперсных сред, к которым, в частности, можно отнести продукты сгорания, обычно предполагают, что «несерость» несущественна, что на наш взгляд не всегда обоснованно. Причиной «несерости» дисперсной среды могут быть не только оптические характеристики частиц, полосы излучения газа, занимающие достаточно широкие участки спектра [2], но и рассеяние излучения частицами самой среды. Для измерения температуры частиц выбирают спектральные интервалы, свободные от излучения газа, но не учитывают возможное влияние рассеяния на вид спектра.

Поскольку способы учета коэффициента излучения в различных методах пирометрии уже разработаны [1], остановимся на способах определения величины этого коэффициента. Экспериментальное определение этой величины существенно увеличивает трудо-

емкость температурных измерений, поэтому целесообразно рассмотреть возможность создания модели излучения дисперсной среды, которая позволила бы определить вид зависимости $\varepsilon(\lambda)$ расчетным путем.

В соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера поглощательную способность среды можно оценить по формуле:

$$\alpha_{\lambda} = 1 - e^{-k_{\lambda} \mu l},$$

где k_{λ} - коэффициент ослабления излучения, μ - концентрация поглощающего вещества, l - длина пути луча.

Формула справедлива для малых концентраций поглощающего вещества, когда взаимодействием частиц можно пренебречь.

На наш взгляд формулу можно использовать и для предварительного анализа спектра излучения рассеивающей среды, понимая под k_{λ} сумму коэффициентов поглощения и рассеяния. Величина k_{λ} связана с эффективным сечением ослабления частицы K_{λ} выражением:

$$k_{\lambda} = \frac{4K_{\lambda}}{\pi d^2},$$

где d - диаметр частицы.

Значение K_{λ} можно вычислить следующим образом [2]:

$$K_{\lambda} = -\frac{(\lambda/m')^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{v=1}^{\infty} i v(v+1)(-1)^v (c_v - b_v),$$

где c_v и b_v - амплитуды соответственно электрических и магнитных колебаний при частоте ν , которые могут быть определены по значениям комплексных показателей преломления материалов частиц m и окружающей среды m' , диаметру частиц d и длине волны излучения λ .

Описанный способ позволяет определить вид зависимости $\alpha(\lambda)$, а, следовательно, и коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda)$ по параметрам частиц (m, d) и окружающей среды (m').

Поскольку величина k_λ в зависимости от длины волны колеблется (рис. 1), график $\varepsilon(\lambda)$ также может иметь довольно сложный вид и содержать несколько экстремумов.

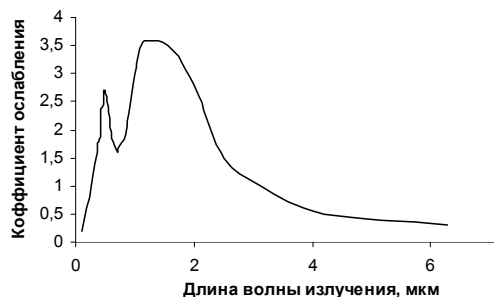


Рисунок 1 – Ослабление теплового излучения частицей диаметром 4 мкм

Решение задачи теплообмена в плоском слое излучающей, поглощающей и рассеивающей среды [3, 4] дает для зависимости $\varepsilon(\lambda)$ аналогичный результат, что подтверждает наши предположения.

Таким образом, предварительная информация о характере спектра излучения дисперсной среды свидетельствует о необходимости определения вида спектра и учета «несерости» среды, например, введением соответствующей поправки в результат измерения.

Что касается неизотермичности и флуктуаций яркости дисперсной среды, то они могут вызывать искажения результата измерения по причине «нелинейного усреднения» температуры пирометром, так как зависимость яркости b^* от температуры T в законах Планка, Вина, Стефана-Больцмана нелинейна. Рассмотрим это на примере закона Стефана-Больцмана:

$$b^* = \sigma T^4.$$

Допустим, что в первый промежуток времени температура объекта равна T_1 , а во второй – $2T_1$. Если в результате инерционности пирометр усредняет сигнал, пропорциональный яркости, то усредняя $b_1^* = \sigma T_1^4$ и $b_2^* = 16\sigma T_1^4$, он выдает результат:

$$b_{\text{изм}}^* = \frac{b_1^* \tau + b_2^* \tau}{2\tau} = 8,5\sigma T_1^4 \text{ или } T_{\text{изм}} = \sqrt[4]{8,5} T_1 \approx 1,7 T_1,$$

что соответствует более высокой температуре, чем средняя. По той же причине результат измерения температуры неизотермической среды превышает среднюю поверхностную температуру.

Кроме того, средняя поверхностная температура зависит от функции распределения

частиц по диаметру. Например, при одинаковой массовой концентрации крупных и мелких частиц суммарная поверхность мелких больше:

$$\frac{S_k}{S_m} = \left(\frac{R_k}{R_m} \right)^2 \cdot \frac{n_k}{n_m} = \frac{R_m}{R_k},$$

где S_k и S_m – суммарные поверхности крупных и мелких частиц соответственно, n_k и n_m – их счетные концентрации, R_k и R_m – их радиусы.

Поэтому в случае зависимости температуры частиц от их диаметра, например, в продуктах сгорания, для перехода от измеренной температуры к средней массовой необходимо учитывать соотношение суммарных поверхностей частиц различного размера. В связи с перечисленными причинами результат измерения температуры неизотермической дисперсной среды может не соответствовать ни средней поверхностной, ни средней массовой, что затрудняет его использование в термодинамических и теплофизических расчетах и требует введения поправок, рассчитанных по ожидаемым параметрам частиц.

Таким образом, особенностью пирометрии дисперсных сред является необходимость учета методических погрешностей, связанных с неизотермичностью, флуктуациями яркости и несеростью излучения. Одним из возможных путей оценки и компенсации этих погрешностей является разработка математической модели излучения дисперсной среды, которая должна учитывать особенности формирования спектра излучающей, поглощающей и рассеивающей среды, ее неизотермичность и флуктуации температуры. Модель среды должна быть связана с математической моделью пирометра, учитывающей его инерционность и нелинейность усреднения температуры объектов, попавших в «поле зрения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. – 296 с.
2. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 332 с.
3. Поляков В.И., Румынский А.Н. Лучистый теплообмен в плоскопараллельном слое излучающего, поглощающего и рассеивающего газа при произвольной индикатрисе рассеяния // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1968. – № 3.
4. Домбровский Л.А. Расчет радиационного теплообмена в плоскопараллельном слое поглощающей и рассеивающей среды // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1972. – № 4.