

Каримова Ф.Ф., Орловская С.Г., Шкоропато М.С., Протас С.К., Панов В.В.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, НИЛ-5

Исследование температурного поля газоздушного пламени Часть 1. Метод пирометрии тонкой нити

Описан метод пирометрии тонкой нити, представляющий модификацию метода относительной яркостной пирометрии, для диагностики температурного поля газоздушных пламен. Рассчитаны основные характеристики метода: рабочий диапазон, чувствительность, инерционность и погрешность.

Газоздушные пламена широко используются в современных технологических процессах, таких как термическая сварка и резка металлов, нанесение термостойких покрытий, а также газопламенный синтез наноксидов [1]. Активно разрабатываются новые типы высокотемпературных горелочных устройств. В то же время востребованы энергосберегающие низкотемпературные инфракрасные и каталитические горелки. Усовершенствование способов сжигания топлива требует развития современных методов диагностики пламен, в том числе распределения температуры по факелу. Появление новых источников и приемников излучения позволили резко увеличить быстродействие и информативность оптических методов исследования быстропротекающих процессов. Современные диагностические комплексы базируются на широком использовании компьютерной техники, что позволяет получать и обрабатывать большие массивы данных в режиме реального времени.

Как известно, пламена являются нестационарными системами и характеризуются наличием значительных градиентов температур и концентраций компонентов. Так как потоки тепла и компонентов зависят от производных, то исследования структуры пламени требуют достаточно точных измерений с высоким пространственным и временным разрешением [2].

Традиционные методы пирометрии пламен (метод обращения дублета натрия, метод относительных интенсивностей спектральных линий, контактные методы) являются трудоемкими, не отличаются быстродействием и высоким пространственным разрешением. В последние годы для исследования температурных полей газоздушных пламен используется метод пирометрии тонкой нити TFP (thin-filament pyrometry) [3], основанный на регистрации теплового излучения тонкой инертной нити, помещенной в факел, с помощью цифровой камеры и последующей компьютерной обработкой изображений. Наиболее подходящим излучателем является нить карбида кремния SiC, который химически инертен и обладает стабильными свойствами (высокой излучательной способностью и хорошей механической прочностью) при высоких температурах. В качестве реперной точки авторы работы [3] использовали значение локальной температуры в наиболее горячей зоне факела, измеренное с помощью термо-

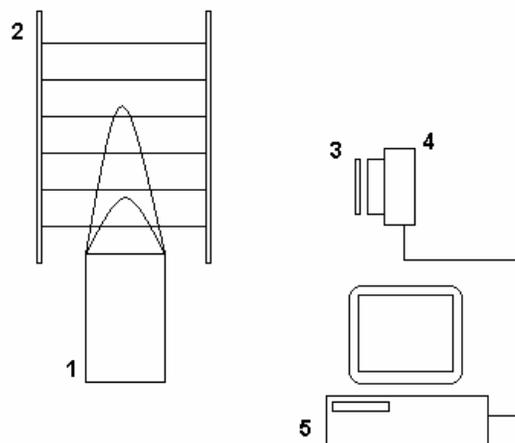


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – горелка Бунзена; 2 – кассета с кварцевыми нитями; 3 – интерференционный фильтр; 4 – цифровая камера; 5 – компьютер.

пары. Иногда предполагают, что в зоне максимального нагрева температура факела достигает адиабатического значения.

Метод относительной яркостной пирометрии. Разработанный нами метод относительной яркостной пирометрии [4] отличается от описанных в литературе модификаций метода TFP тем, что в качестве точки отсчета используется значение яркостной температуры, определенное с помощью яркостного пирометра типа Проминь М1 или ЭОП68. В качестве излучателя мы использовали тонкие кварцевые нити. Излучение нити в узком спектральном интервале (0.77 мкм) регистрировали цифровой камерой типа Canon 350D.

Распределение температуры по длине нити $T(x)$ рассчитывали по формуле

$$\frac{1}{T(x, y)} = \frac{1}{T_0} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{S_0}{S(x, y)} \right], \quad (1)$$

где $T(x, y)$ – яркостная температура в произвольной точке x , К;

T_0 – яркостная температура в фиксированной точке (x_0, y_0) нити, измеренная яркостным пирометром, К; S_0 и $S(x, y)$ – сигналы матрицы в соответствующих точках изображения, отн.ед.; λ – рабочая длина волны светофильтра, мкм.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

Излучение от кварцевых нитей (диаметр 150 мкм, длина 10 см), расположенных горизонтально с шагом 1 см, регистрировалось в узком спектральном интервале с помощью цифровой камеры. На рис. 2 приводится фотография кварцевых нитей в факеле, нагретых до свечения.

Основные характеристики метода. При исследовании термической структуры газоздушного факела первостепенное значение имеют следующие характеристики экспериментального метода: диапазон регистрируемых температур, пространственное разрешение и инерционность. Так как температурное

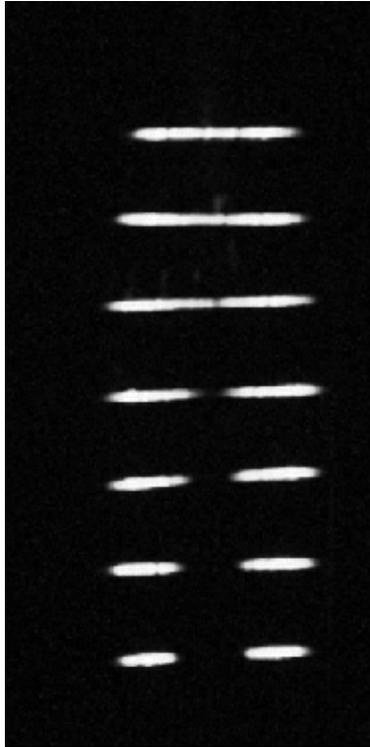


Рис.2. Изображение нагретых кварцевых нитей в газоздушном факеле.

поле факела характеризуется значительными перепадами температур, необходимо обеспечить максимальный интервал регистрируемых одновременно температур. Оценка рабочего диапазона разработанного метода показала, что температурный диапазон существенно зависит от значения яркостной температуры в реперной точке – T_0 .

Предположим, что измеренное значение T_0 отвечает среднему уровню сигнала матрицы, то есть $S_0 = 0.5 \cdot S_{\max} = 2048$ (разрядность матрицы цифровой камеры равна 12 бит/канал), и для измерений использован полный интервал линейности матрицы: $20 \leq S \leq 3686$. Тогда соответствующие верхняя (T_{\max}) и нижняя (T_{\min}) границы диапазона измерения яркостной температуры можно определить из формулы Вина:

$$\frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{S_{\max}}{S_0} \right], \quad (2)$$

$$\frac{1}{T_{\min}} = \frac{1}{T_0} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{S_0}{S_{\min}} \right],$$

где $\lambda = 0.77$ мкм; $C_2 = 1.438 \cdot 10^4$ мкм·К.

В таблице приведены границы диапазона регистрируемых температур T_{\max} , T_{\min} , а также относительная ширина рабочего диапазона $(T_{\max} - T_{\min})/T_0$ в зависимости от значения реперной температуры T_0 .

Чувствительность метода оценивалась по следующей формуле:

Таблица. Пределы измерения температуры T_{\max} , T_{\min} , относительная ширина рабочего интервала и чувствительность в зависимости от температуры T_0 .

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| T_0 | 1000 | 1200 | 1400 | 1800 | 2000 | 2400 | 2800 | 3000 |
| T_{\max} | 1032 | 1247 | 1465 | 1908 | 2134 | 2596 | 3071 | 3313 |
| T_{\min} | 802 | 926 | 1040 | 1246 | 1339 | 1506 | 1656 | 1724 |
| $\frac{(T_{\max} - T_{\min})}{T_0}$ | 0.205 | 0.268 | 0.304 | 0.36 | 0.398 | 0.454 | 0.505 | 0.53 |
| $\delta T, K$ | 0.1 | 0.16 | 0.2 | 0.4 | 0.42 | 0.6 | 0.9 | 1 |

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\lambda \cdot T}{C_2} \cdot \frac{\delta S}{S}, \quad (3)$$

где δS – среднеквадратичное отклонение сигнала матрицы, которое зависит от значения чувствительности по ISO и температуры матрицы. В условиях эксперимента $\delta S = 5$. Для среднего значения сигнала матрицы ($S_0 = 2048$), соответственно, имеем:

$$\frac{\delta T}{T} = 1.8 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, данный метод обеспечивает достаточно высокую чувствительность. В таблице приведены расчетные характеристики метода. Отметим, что максимальный относительный интервал регистрируемых яркостных температур соответствует максимальному значению реперной температуры $T_0 = 3000$ К.

Так как пламя в общем случае является нестационарной системой, для корректной диагностики требуется малая инерционность измерительной схемы. Оценка постоянной времени датчика температуры на основе тонкой кварцевой нити была выполнена по следующей формуле [5]:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{\chi + \sqrt{2\pi d \chi \rho v}}, \quad (4)$$

где m – масса нити; χ – удельная теплопроводность материала (кварца); d – диаметр нити; c – теплоемкость газа; ρ – плотность газа; v – скорость газа относительно нити.

В нашем случае размеры нити $d = 100$ мкм, $L = 10$ см, для продуктов сгорания стехиометрической пропан-воздушной смеси $c = 1.2$ Дж/г·К, $\rho = 1.2 \cdot 10^{-3}$ г/см³, и мы имеем $\tau \sim 10^{-4}$ с, следовательно, быстроедействие метода ограничено временем экспозиции и равно примерно 10^{-2} с.

Методическая погрешность метода. Была рассчитана методическая погрешность метода, которая равна разности локальной температуры газовой фазы и температуры нити вследствие теплопотерь излучением с поверхности нити по следующей формуле:

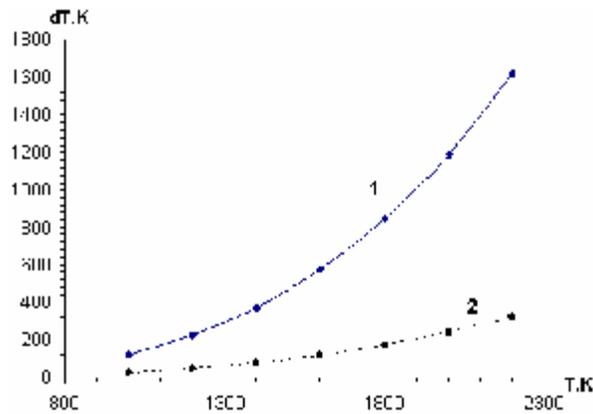


Рис.3. Разность между локальной температурой газа и температурой нити в зависимости от температуры нити: 1) $d = 100$ мкм; 2) $d = 20$ мкм ($\varepsilon = 0,7$).

$$\Delta T = T_g - T = \frac{\varepsilon \sigma}{\alpha} (T^4 - T_w^4), \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; α – коэффициент теплоотдачи; ε – коэффициент излучательной способности; T_w – температура стенок реакционной установки.

$$\alpha = \frac{\chi_g Nu}{d}$$

χ_g – коэффициент теплопроводности воздуха; Nu – коэффициент Нуссельта $Nu=0.5$; d – диаметр проводника.

Как видно из графика на рисунке, эта погрешность не мала и быстро растет с температурой, поэтому ее надо обязательно учитывать. Кроме того величина погрешности существенно зависит от диаметра нити. Поэтому для повышения точности измерений желательно использовать нить достаточно малого диаметра, в идеале это должна быть нить SiC, как в работе [3].

С помощью описанного метода было изучено температурное поле факела горелки Бунзена. Определены границы зон пламени, установлено, что максимальная температура достигается в зоне продуктов сгорания.

Выводы. Разработан и апробирован метод пирометрии тонкой нити для регистрации термической структуры газоздушного факела. Метод характеризуется высокой чувствительностью, широким рабочим интервалом, малой инерционностью. Недостатком метода является значительная методическая погрешность измерений при высоких температурах. Поэтому данный метод подходит для исследования низкотемпературных пламен, таких как пламя бунзеновской горелки. При температурах, превышающих 1700К, необходимо использовать в качестве излучателя тонкие термостойкие нити карбида кремния.

Литература:

1. *Hee Dong Jangi, Hankwon Changi and Kikuo Okuyama.* Synthesis of Binary Component Metal Oxide Nanoparticles by Flame Spray Pyrolysis // Resources Processing. – 2007. – V.54. – P.9-13.
2. *Robert M. Fristrom.* Flame structure studies: past, present and future // Pure and Applied Chemistry. – Vol. 62, No. 5. – 1990. – P. 839-849.
3. *Peter Struk and Daniel Dietrich.* Comparisons of Gas-phase Temperature Measurements in a Flame Using Thin-Filament Pyrometry and Thermocouples // American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal. – 2003. – P.853.
4. *Каримова Ф.Ф., Орловская С.Г., Калинин В.В., Шкороподо М.С.* Исследование температурных полей излучающих объектов // Физика аэродисперсных систем. – 2006. – Вып.43. – С.39-43.
5. *Чуйко В.А.* Моделирование рабочих характеристик импульсного термисторного термоанемометра // Научные работы ДонНТУ. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – 2004. – Донецк, ДонНТУ.

Karimova F.F., Orlovskaya S.G., Shkoropado M.S., Protas S.K., Panov V.V..

Investigation of gaseous flame thermal structure

1. Thin filament pyrometry method.

SUMMARY

Thin filament pyrometry method for gaseous flames diagnostics was described as modification of relative brightness pyrometry. The method main characteristics were estimated: temperature range, sensitivity, time constant, precision.

Карімова Ф.Ф., Орловська С.Г., Шкороподо М.С., Протас С.К., Панов В.В.

Дослідження температурного поля газоповітряного факела.

Частина 1. Метод пірометрії тонкої нитки.

АНОТАЦІЯ

Описано метод пірометрії тонкої нитки, яка представляє модифікацію методу відносної яскравісної пірометрії для дослідження структури газоповітряних полум'їв. Розраховані основні характеристики методу: робочий діапазон, чутливість, інерційність і похибка.