

07;12

Метод цифровой фотометрии в исследовании структуры вихревого пламени

© М.М. Алексеев, В.П. Самсонов

Сургутский государственный университет
E-mail: svp@iff.surgu.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2006 г.

Предложен способ применения метода обработки цифровых изображений для визуализации вихревых течений и расчета полей температур и концентраций в пламени. Получены фотографии свечения обращенного пламени и его фотометрических изображений. Обнаружено, что фотометрические изображения идентичны интерференционным. Показано, что основными преимуществами метода цифровой фотометрии являются простота и дешевизна эксперимента. Приведено теоретическое обоснование метода расчета температуры. Приведены результаты расчета температуры для осесимметричного обращенного пламени.

PACS: 47.80.Jk

Получение достоверных данных о параметрах течения часто требует одновременного применения различных экспериментальных методов измерения. Широко распространенные интерференционные методы экспериментального исследования структуры нестационарных и неоднородных течений обладают двумя существенными недостатками. Первый из них связан с применением дорогостоящего оборудования. Второй — с трудностью интерпретации полученных изображений, поскольку результирующий сдвиг фаз между интерферирующими световыми волнами обусловлен влиянием множества физических факторов. Современные программные средства обработки цифровых изображений объектов позволяют предложить еще один дополняющий бесконтактный метод исследования прозрачных излучающих потоков — метод цифровой фотометрии.

Примерами излучающих прозрачных оптических неоднородностей являются электрические разряды, люминесценция и флюоресценция жидкостей, пламена, образующиеся при горении газовых и конденсированных топлив и др. Современное программное обеспечение позволяет

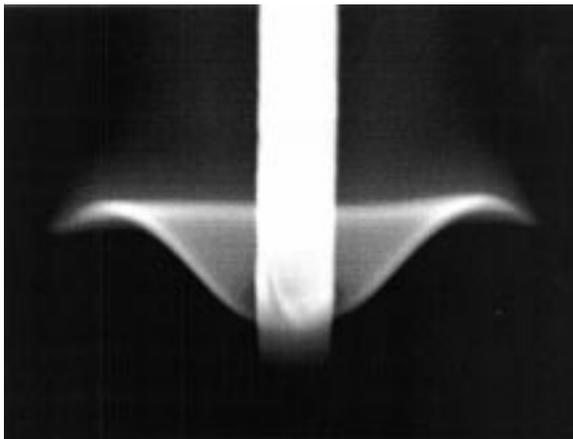


Рис. 1. Фотография свечения осесимметричного „обращенного“ пламени.

получить распределение амплитуды световых лучей на плоскости ПЗС-матрицы цифровой фотокамеры. Фотография свечения осесимметричного „обращенного“ пламени, полученного при горении стехиометрической пропановоздушной смеси, представлена на рис. 1. Фотометрическое изображение этого пламени, представляющее собой картину изолиний интенсивности световых волн и полученное с помощью программы обработки изображений „GIMP 2.2“, приведено на рис. 2. Цветные линии на изображении пламени в оригинале соответствуют тому или иному значению интегральной энергетической светимости пламени.

Внешне фотометрическое изображение напоминает интерференционную картину пламени. Цветность линий на фотометрическом изображении пламени определяет величину результирующей энергетической светимости и может повторяться для различных ее значений. В связи с этим при обработке фотометрических изображений, так же как и при описании интерференционной картины, удобно пользоваться термином „порядок фотометрической линии“. Аналогия фотометрического изображения с интерференционной картиной не случайна. Известно, что порядок интерференции световых лучей определяется локальными значениями показателя преломления света и геометрической длиной пути луча в оптической неоднородности, т.е. его оптической длиной.



Рис. 2. Фотометрическое изображение „обращенного“ пламени.

Результирующее значение энергетической светимости также определяется и длиной пути светового луча, проходящего через оптическую неоднородность, и локальным значением спектральной плотности энергетической светимости. Порядок фотометрической линии, т.е. номер цветной линии, следует отсчитывать с внешнего края изображения. Цвет линии имеет значение только в том смысле, что помогает правильно определять тенденцию порядка линии к изменению (уменьшению или увеличению). В этом заключается одно из преимуществ метода цифровой фотометрии по сравнению с интерференционным, поскольку в случае образования „седловин“ на изображении всегда можно точно указать порядок фотометрической линии.

В общем случае порядок линии $\delta(x, y)$ в плоскости изображения связан с локальным значением спектральной плотности энергетической светимости $R_{v,T}(x, y, z)$ соотношением

$$\delta(x, z) = \int_{z_1}^{z_2} [R_{v,T}(x, y, z) - R_{0v,T}] dz, \quad (1)$$

z_1 и z_2 — координаты краев оптической неоднородности, находящихся на линии наблюдения изображения, $R_{0v,T}$ — плотность энер-

гетической светимости фона, на котором отснято изображение исследуемого объекта. Для определения $R_{v,T}(x, y, z)$ по уравнению (1) необходимо знать геометрическую форму неоднородности. Так же как и в случае интерференционной картины, наиболее простыми часто распространяемыми вариантами являются тепловые неоднородности, обладающие осевой симметрией. В такой неоднородности в каждом его сечении линии с постоянным значением $R_{v,T}(x, y, z)$ являются концентрическими окружностями [1]. Уравнение (1) в этом случае можно записать в виде интегрального уравнения Абеля относительно неизвестной функции $R_{v,T}(x, r)$:

$$\delta(x, r) = \int_{r=x_i}^{r_0} \frac{R_{v,T}(x, r)r}{\sqrt{r^2 - x_i^2}} dr. \quad (2)$$

Решая уравнение (2) одним из известных методов, можно получить радиальные распределения спектральной плотности энергетической светимости в каждом из поперечных сечений неоднородности.

Пусть оптическая неоднородность является тепловой и излучающей, как, например, пламя. Свечение пламени обусловлено излучением сажевых частиц. Для большинства углеводородных топлив сажевые частицы с большой точностью можно считать абсолютно черным телом. Тогда можно использовать закон Стефана–Больцмана, устанавливающий зависимость интегральной энергетической светимости от температуры:

$$\int_0^{\infty} R_{v,T} dv = \sigma T^4,$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана, T — температура. Абсолютное значение интегральной энергетической светимости остается в условиях эксперимента неизвестным. Ее величину можно определить экспериментальным путем по известному значению температуры в некоторой точке. Например, для обращенного пламени, представленного на рис. 1, легко определить температуру вблизи раскаленного стабилизатора, представляющего собой тонкую натянутую стальную проволоку. Для этого необходимо измерить температуру стабилизатора другим способом, например, с помощью термопары или оптического пирометра [2]. Тогда можно установить однозначную связь между распределением локальной энергетической светимости и температурой.

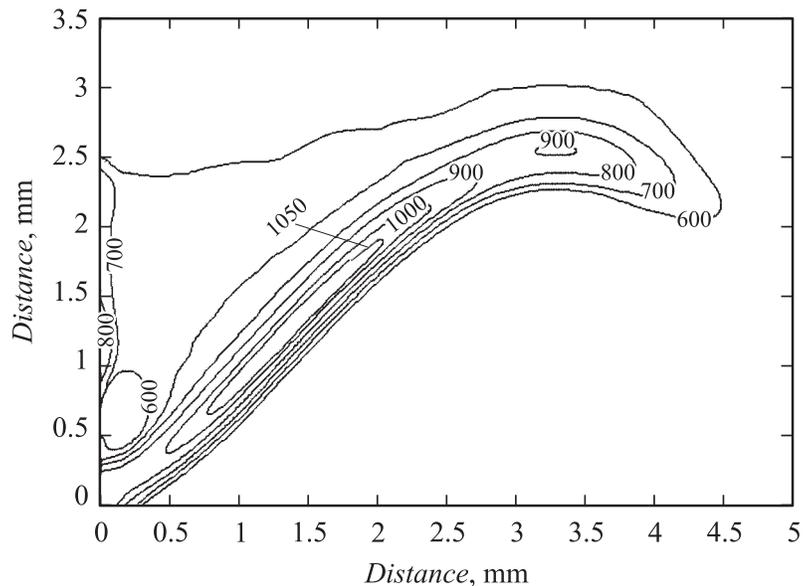


Рис. 3. Температурное поле „обращенного“ пламени. Температура указана по шкале Цельсия.

На рис. 3 приведен результат расчета температуры в „обращенном“ пламени. Решение интегрального уравнения Абея находили приближенным методом Шардина, описанным в работе [3], в котором поперечное сечение фотографии разбивали на концентрические зоны, число которых равнялось числу пикселей на ПЗС-матрице на длине, равной радиусу пламени. Расположение изотерм указывает на смещение зоны максимальной температуры в область основания конуса пламени. За фронтом пламени вблизи поверхности стабилизатора образуется зона пониженной температуры. Распределение градиента температур на передней части фронта пламени свидетельствует о наличии касательной составляющей вектора плотности теплового потока и влиянии „стретч-эффекта“, обусловленного течением газа от вершины конуса пламени к его основанию. Результаты расчета температурного пламени, подверженного „стретч-эффекту“, согласуются с данными, приведенными в литературе [4].

Список литературы

- [1] Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. 240 с.
- [2] Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура. М.: Металлургиздат, 1959. 333 с.
- [3] Аbruков С.А. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1962. 83 с.
- [4] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.