

## ИЗМЕРЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ CCD-КАМЕРАМИ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

**М.П. Бороненко**

Югорский государственный университет  
г. Ханты-Мансийск

В данной статье изложен метод измерения температуры движущихся частиц с помощью высокоскоростной видеокамеры. Данный метод применим в области плазменного напыления.

**Ключевые слова:** напыление, высокоскоростные видеокамеры, измерение температуры

Одной из наиболее важных проблем в области плазменного напыления, является оптимизация режима нанесения покрытий, который зависит от набора взаимосвязанных гидродинамических, теплофизических и физико-химических параметров [1-3]. Такая многопараметрическая модель требует разработки комплексного подхода к процессу измерений в нестационарных высокотемпературных потоках. Оптические методы в решении этой задачи занимают ведущую позицию. Однако быстротечность плазменных потоков затрудняет оценку температуры частиц как традиционными зондовыми и контактными методами, так и бесконтактными оптическими методами лазерной анемометрии и пирометрии [4-6] из-за сильного влияния рефракции в высокотемпературных зонах потока и турбулентных завихрений на границах скачка давления. При этом дело осложняется тем, что недостаточно получать лишь одну «осредненную» оценку температуры, так как качество и свойства покрытия зависят от характера распределения частиц по температуре.

Цель работы – разработать метод измерения температуры отдельных частиц, движущихся в потоке при напылении порошковых покрытий.

Методика определения температуры частицы в потоке напыления включает измерение интенсивности излучения с помощью высокоскоростной видеокамеры ВидеоСпринт и является развитием методов высокоскоростной микропирометрии, изложенной в работах [7-10].

Оптическое излучение летящей светящейся частицы через объектив высокоскоростной видеокамеры ВидеоСпринт падает на фотокатод, преобразуясь в поток электронов, который усиливается на микроканальных пластинах, а затем на люминофорном экра-

не ЭОПа преобразуется в излучение. После, излучение попадает на светочувствительную область матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС), где происходит экспозиционное (от 20 нс до 20 мкс) накопление заряда (размер светочувствительной области 15.3 \* 12.3 мм, диагональ 19.67 мм; размер пикселя 12 \* 12 мкм). Затем происходит оцифровка данных аналого-цифровым преобразователем (АЦП) разрядностью 10 бит; и запись видеофайлов 8 бит. После дискретизации и квантования сигнала в АЦП изображение в памяти видеокамеры представляет собой матрицу, каждый элемент которой является пикселем определенной яркости.

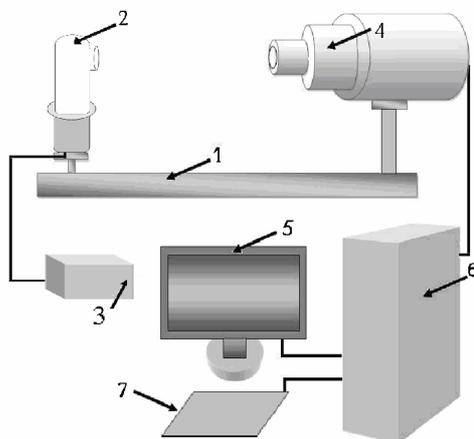
В общем случае матричные ПЗС предназначены для формирования электрического видеосигнала, соответствующего двумерному оптическому изображению, спроецированному на его светочувствительную поверхность. В режиме накопления заряда [11] за время экспозиции в светочувствительной области ПЗС летящие светящиеся частички сдвигаются на расстояние, зависящее от скорости, с которой движется каждая из них. В результате мы получаем так называемый «смаз» изображения, в виде пространственного распределения энергетической освещенности на плоскости или двумерных массивов точек. Точка на 2-D сетке называется пикселем (pixel или pel). Эти названия являются сокращениями понятия picture element (элемент изображения). Пиксель представляет энергетическую освещенность в соответствующем месте сетки. Поэтому, изображение летящей светящейся частицы наблюдается на мониторе в виде области(линии), яркость каждого пикселя которой имеет свое значение.

Для использования видеокамеры в качестве высокоскоростного пирометра была

## ИЗМЕРЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ ССD-КАМЕРАМИ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

проведена калибровка по эталонной температурной лампе ТРУ1100-2350. Яркостная температура лампы равна на определенной длине волны температуре абсолютно черного тела (АЧТ), при которой яркости АЧТ и лампы одинаковы.

Изображение, вольфрамовой нити накала было представлено в шкале серого. Серая шкала отображает интенсивность света в каждом пикселе полученного изображения в области видимой части электромагнитного спектра. В зависимости от подаваемого на эталонную лампу ТРУ 100-2350 с источника PSH-2035 тока, вольфрамовая нить лампы имеет различную температуру, а следовательно, и яркость. Зная ток, протекающий через лампу, можно по имеющейся таблице найти яркостную температуру нити накала.



Условные обозначения:

1 – оптическая скамья; 2 – эталонная лампа ТРУ1100-2350; 3 – источник тока PSH-2035; 4 – высокоскоростная камера ВидеоСпринт; 5 – монитор; 6 – системный блок; 7 – клавиатура

Рисунок 1 – Калибровочный стенд

Произведем видеосъемку нити накала лампы при разных токах (прочие условия одинаковы). Регистрируемое видеокамерой излучение лампы будет иметь разную яркость. Так же, в зависимости от времени накопления заряда (экспозиции), двумерное изображение вольфрамовой нити получается разной яркости.

Поставив в соответствие яркости пикселей ток, подаваемый на лампу, можно ввести новую калибровочную шкалу, связывающую яркость пикселей изображения и температуру регистрируемого видеокамерой на данной экспозиции светящегося объекта.

При определении температуры одной из напыляемых частиц воспользуемся видеофайлами, полученными откалиброванной видеокамерой. Первый кадр содержит изображение плазменного потока без напыляемых частиц, на втором кадре изображение плазменной струи с напыляемыми частицами.

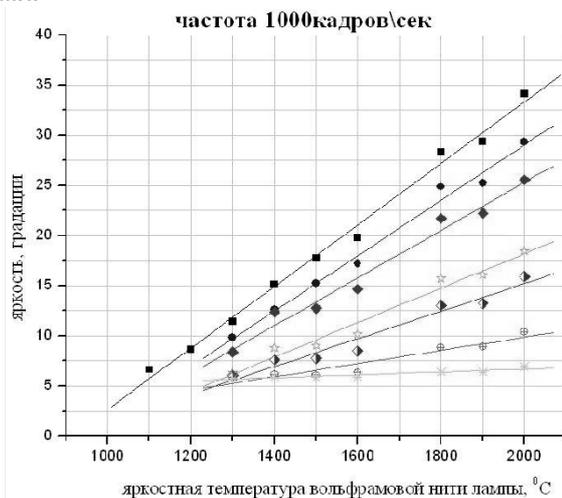


Рисунок 2 – Соответствие яркостной температуры лампы градациям яркости пикселей изображения при съемке 1000 кадров в секунду на разных экспозициях (сверху вниз: 20 мкс; 10 мкс; 5 мкс; 1 мкс; 500 нс; 20 нс)

Все нагретые частицы конденсированной фазы имеют непрерывный спектр собственного теплового излучения. Для того, чтобы устранить регистрируемое нетепловое излучение, необходимо осуществить вычитание из второго кадра 2 усредненное значение яркости пикселей первого кадра.

Пусть частица круглая, радиуса  $r$ ,  $l$  – длина трека частицы. Полное излучение частицы за время экспозиции (накопления) можно охарактеризовать суммарной яркостью пикселей вдоль трека:

$$I_{\Omega} = \frac{2}{\pi r^2} \int_0^l I(x, y) dx dy$$

При рассмотрении фотографии трека частицы квадрат, описывающий частицу, имеет размеры  $(2r) \times (2r)$ . Если частица движется, то на длине трека  $l$  укладывается  $l/2r$  таких частиц. Поэтому суммарная яркость излучения в дискретном представлении будет

$$I_{\Omega} = N \cdot \bar{I} = \frac{l}{2r} \cdot \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=i_0, j=j_0}^{n, m} I_{ij},$$

где  $n$  – число пикселей вдоль трека по оси  $X$ ,  $m$  – число пикселей вдоль трека по оси  $Y$ ,  $N$  –

интегральный поправочный коэффициент, усредненный по всему изображению.

Если суммарная яркость пикселей трека при данной экспозиции не превосходит 255, то по графику соответствия яркостной температуры лампы грациям яркости пикселей изображения можно определить температуру движущейся частички. Яркость светящегося объекта меньше на короткой экспозиции, чем яркость этого же объекта на больших экспозициях. На разных временах накопления частица успевает пролететь разные расстояния, а следовательно, разное количество пикселей будет составлять трек.

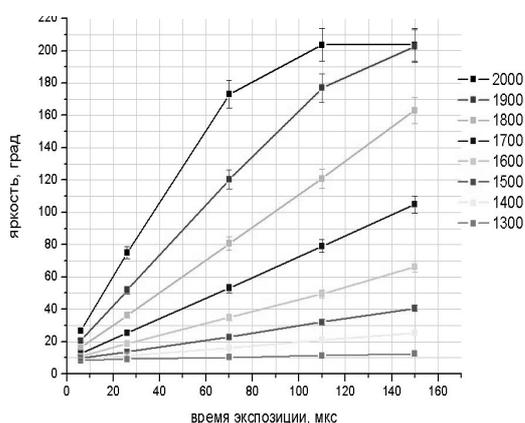


Рисунок 3 – Зависимость яркости пикселей изображения температурной лампы от времени экспозиции

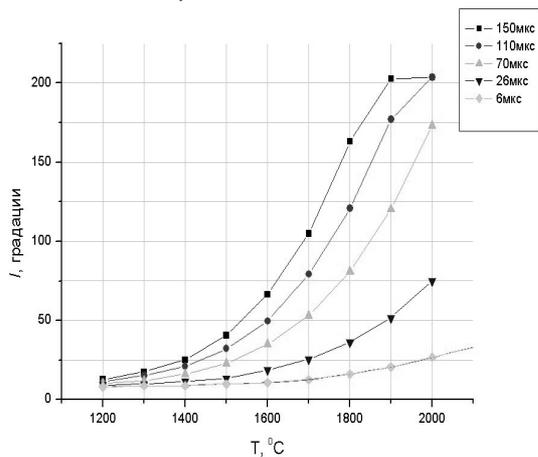


Рисунок 4 – Зависимость яркости пикселей изображения температурной лампы от температуры для калибровочной лампы на разных временах экспозиции

Поэтому, как видно из графиков на рис.3, одной и той же температуре, а также соответствующему значению градаций яркости, могут быть сопоставлены либо разные вре-

мена накопления, либо разные температуры эталона. Следовательно, можно найти коэффициент для перевода яркости изображения из одной экспозиции в другую, при условии неизменности температуры объекта. Таким образом, можно узнать температуру, соответствующую градации яркости пикселей изображения на другом времени накопления. Например, при регистрации потока излучения на 150мкс получается изображение яркостью 200 градаций.

Если же время накопления того же сигнала было 26 мкс, то изображение имеет яркость 50 градаций. Коэффициент перевода равен:

$$k = \frac{I_{26}}{I_{150}} = \frac{50}{200} = 0,4$$

Поэтому, если суммарная яркость превосходит 255, то необходимо осуществить пересчет значения суммарной яркости в более короткую экспозицию.



Рисунок 5 – Выделенный трек отдельной частицы в плазменном потоке (в прямоугольном окне в верхней части кадра)

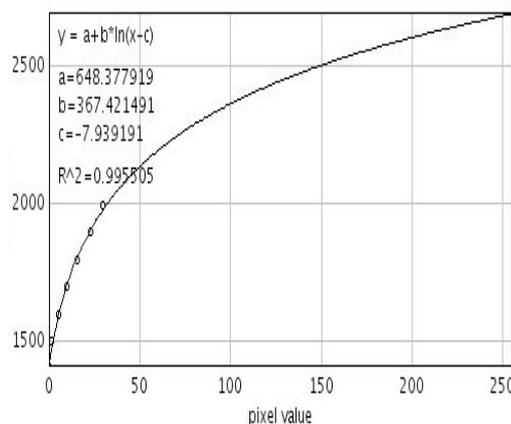


Рисунок 5 – Интерполяция калибровочного графика соответствия яркости пикселей изображения температуре (в градусах Цельсия 0C) для экспозиции 2мкс  
ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2012

## ИЗМЕРЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ ССD-КАМЕРАМИ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

В кадре полученном на экспозиции 20 мкс выделяем трек частицы, оценить температуру которой мы хотим. Из анализа изображения получаем следующие данные: длина выделенного трека 20 единиц, высота трека, которая равна двойному радиусу частицы, составляет 5 единиц, среднее значение яркости внутри выделения равно 116 градациям.

В результате получаем следующие значения:  $N=4$ ;  $I_{\Omega}=116 \times 4=464$  градации. Коэффициент перехода от экспозиции 20 мкс к 2 мкс равен 0,4. Поэтому,  $I_{\Omega}=116 \times 0,4 \times 4=188$  градаций при времени накопления 2 мкс, что по интерполяционному графику соответствует температуре  $2589^{\circ}\text{C}$ , со среднеквадратической ошибкой около  $50^{\circ}\text{C}$ , что составляет не более 2%. Таким образом [12-13], оценка яркостной температуры выбранной частички, в данном примере, дает значение  $2500^{\circ}\text{C}$ , вместо заниженного значения в  $800^{\circ}\text{C}$ , которое получалось бы без учета движения частицы и «смаза» изображения на кадре ПЗС-матрицы. Введение поправок на движение частиц в плазменном потоке позволило впервые получить реальные оценки фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазматрона МЭВ-50 в режиме постоянной подачи порошка [14].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарколь Д.А., Гуляев П.Ю., Евстигнеев В.В., Мухачев А.Б. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования процессов СВС // Физика горения и взрыва, 1994, т. 30, № 1, С.72-77.
2. Евстигнеев В.В., Гуляев П.Ю., Гончаров В.Д. Исследование тонкой тепловой структуры СВ-синтеза методом быстродействующей цифровой тепловизионной съемки // Вестник Алтайского научного центра сибирской академии наук высшей школы, 2003, №4, С. 3-6.
3. Долматов А.В., Гуляев П.Ю., Бороненко М.П. Диагностика распределения частиц по температурам в технологии плазменного напыления // Ползуновский альманах, 2010, № 2, С. 71 – 73.
4. Гуляев П.Ю., Иордан В.И. Пирометр с широтно-импульсной модуляцией на основе МДП-фотодиодных матриц в режиме накопления заряда // Известия высших учебных заведений. Физика, 2006, №9, Приложение, С. 132-136
5. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления // Известия Самарского научного центра российской академии наук, 2009, т. 11, № 5-2, С.382-385.
6. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления // Системы управления и информационные технологии, 2009, № 1.2 (35), С. 230-233.
7. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Трековый анализ скорости частиц и определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазматрона // Ползуновский альманах, 2008, № 2, С.23-26.
8. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Иордан В.И. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному спектру // Ползуновский альманах, 2008, № 2, С. 13-14.
9. Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Гуляев И.П., Соловьев А.А. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц // Известия высших учебных заведений. Физика, 2008, Т. 51, № 9-3, С. 79–87.
10. Гуляев П.Ю., Калачев А.В. Пирометрия процесса СВС на основе МДП-фотодиодных матриц в режиме накопления заряда // Ползуновский вестник, 2005, № 4-1, С. 171-174.
11. Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Попов В.А., Леонов Г. Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках // Ползуновский вестник, 2012, № 2-1, С. 4-7.
12. Патент 2099674 РФ. МПК G01J 5/52. Способ измерения яркостной температуры объекта /В.В. Евстигнеев, В.М. Коротких, П.Ю. Гуляев, А.В. Еськов, М.А. Гумиров. Заявлено 01.07.1996; Оpubл. 20.12.1997, Бюл. № 35. -2 с.:
13. Патент 2094787 РФ. МПК G01N 25/28, G01J 5/12. Способ измерения температуры фронта горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза смеси дисперсных материалов / П.Ю. Гуляев, М.А. Гумиров, В.В. Евстигнеев. Заявлено 01.07.1996; Оpubл. 16.01.1998, Бюл. № 1. -5 с.
14. Бороненко М.П., Гуляев П.Ю., Трифонов А.Л. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазматрона с постоянной подачей порошка // Вестник Югорского государственного университета, 2012, № 2 (25), С. 16-20.

**Бороненко Марина Петровна – аспирантка, тел.: (3467) 35-77-97, e-mail: shs\_lab@ugrasu.ru**