

ВИРТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОПИРОМЕТРИИ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММ ORIGIN И IMAGEJ

П.Ю. Гуляев, М.П. Бороненко
Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

В статье рассмотрен метод измерения количественных характеристик СВС с помощью высокоскоростной съемки и дальнейшей компьютерной обработки полученных данных.

Ключевые слова: СВС, обработка данных, высокоскоростные видеокамеры.

Наиболее перспективным методом диагностики процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является высокоскоростная видеосъемка с компьютерной обработкой данных и оптическое измерение профиля температур в волне горения [1, 2]. Трудности исследования неустойчивого СВС [3] связаны с разнообразием систем и механизмом горения. В общей постановке задача исследований неустойчивого твёрдопламенного горения ещё не решена, и исследования в данной области актуальны.

Цель работы: разработать систему получения количественных характеристик СВС и обработки экспериментальных данных на основе высокоскоростной видеокамеры ВидеоСпринт. Техническим средством системы обработки информации является высокоскоростной микропирометрический комплекс измерения температуры и скорости распространения пламени (ПК, видеокамера). Программное обеспечение включает в себя пакет анализа экспериментальных данных Origin7 и свободно распространяемую программу обработки графических изображений ImageJ.

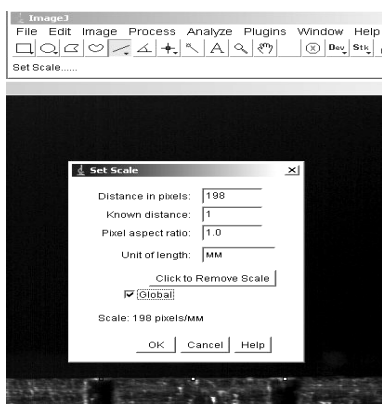


Рисунок 1 – Диалоговое окно для введения новой шкалы в программе ImageJ
ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2012

Для использования видеокамеры в качестве высокоскоростного пирометра была проведена калибровка по эталонной температурной лампе ТРУ1100-2350 [1]. 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. Калибровка пространственного масштаба проводится по числу пикселей, укладываемых на изображении деления 1 мм измерительной линейки (рисунок 1). Покадровые изображения распространения волны горения СВС, полученное видеокамерой сохраняется в формате «avi». Этот файл содержит информацию о пространственном распределении энергетической освещенности на плоскости, в виде двумерных массивов точек. Обработка данного массива осуществляется в программе ImageJ, что поэтапно показано на рисунках 2, а-г.

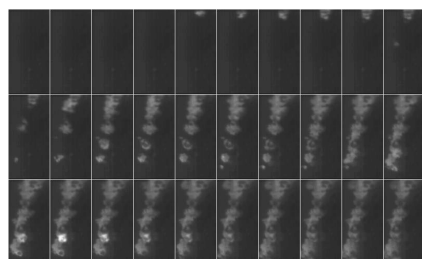
Прежде чем перейти к получению количественных характеристик СВС таких как температура и скорость распространения волны, необходимо вычистить из изображения фон (кадр, снятый на соответствующей экспозиции с закрытым объективом). Для этого можно воспользоваться фильтром Image Subtract Calculator, который выполняет арифметические и логические операции между двумя изображениями. Разность двух изображений $f(x,y)$, $h(x,y)$ выражаемая формулой

$$G(x,y) = f(x,y) - h(x,y)$$

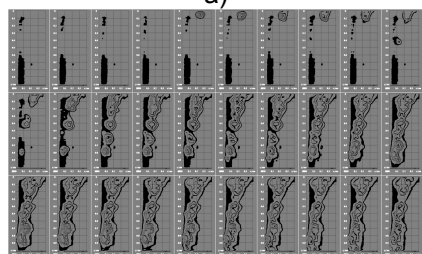
Получается вычислением разностей между парами значений всех соответствующих пикселей изображений $f(x,y)$ и $h(x,y)$.

При анализе хаотических волн горения СВС [4, 5], когда образуется множество очагов, движущихся в разных направлениях с

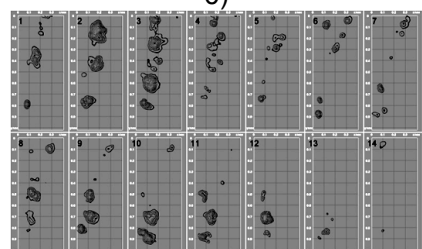
разной скоростью. Для более точного выделения новых очагов горения можно воспользоваться тем же фильтром (Image Subtract Calculator). В данном случае происходит прослеживание (сегментация) движущихся (вновь появившихся) очагов горения на последовательности кадров. Вычитание позволяет удалить все неподвижные, присутствующие на обоих кадрах очаги.



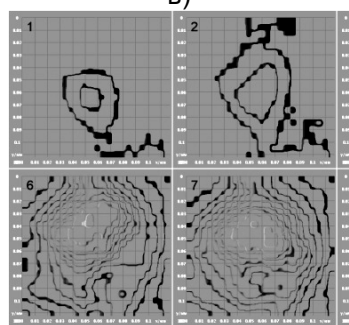
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Обработка экспериментальных данных в программе ImageJ: а) Последовательность кадров распространения волны горения системы Ni-Al б) Градиентные линии температурного поля, соответствующие тем же кадрам; в) Динамика новых очагов горения СВС; г) Тонкая структура очага горения в динамике

После этого устанавливаем порог Threshold, или Color Threshold. Используя данный инструмент можно автоматически или интерактивно настроить верхние и нижние значения порога для сегментирования области интереса и заднего фона изображения. Hue отображает график, в котором можно устанавливать пороги на основе оттенков изображения. Saturation (Насыщенность) позволяет установить верхний и нижний пороги на основе цветовой насыщенности участков изображения. Brightness (Яркость) позволяет выставлять пороги для выделения на основе значений яркости пикселей изображения. Предварительно преобразовав изображение в черно/белое (Make Binary) выбираем в Set Measurements параметры, которые необходимо измерить: Centroid – центральная точка активного выделения и др. Команда Analyze Particles (Анализ частей) измеряет выбранные параметры по принципу сканирования всего изображения или выделения, пока не находит края объекта. Результаты измерения представлены в текстовом файле Results.

Так же с помощью запрограммированных в ImageJ методик возможно исследовать температурный профиль волны горения.

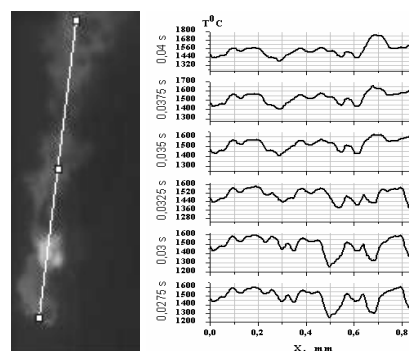


Рисунок 3 – Температурный профиль волны горения и его динамика в выбранном сечении

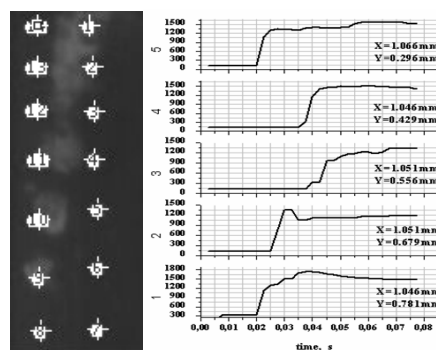


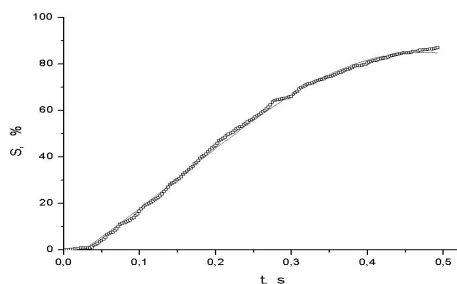
Рисунок 4. Виртуальная микропирометрия для получения термограммы волны горения в выбранных точках

ВИРТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОПИРОМЕТРИИ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММ ORIGIN И IMAGEJ

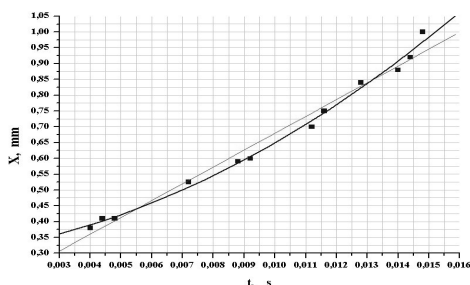
Встроенная функция Plot Profile (График профиля) (Ctrl+K) отображает в двумерной графике интенсивность распределения пикселей на выделенной линии (см. рисунок 3). Сохранение или копирование в буфер обмена будет происходить в виде последовательности строк, отформатированных специальным образом и пронумерованных. Зная зависимость $T(x,t)$, можно получить решение уравнения, как это показано в работе [6] относительно переменной y при фиксированном значении x . Результатом будет график (рисунок 4) зависимости $y=y(t)$, для фиксированной точки x :

Интерполяция «виртуальных» термограммы проводится по формуле:

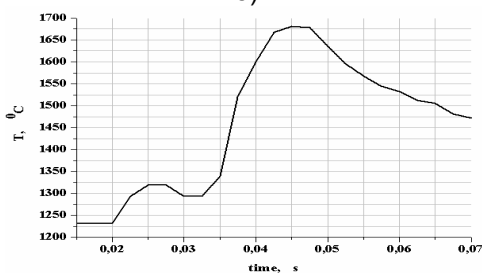
$$f(y) = \frac{(T(x,t) - T_0)|x_1 - x_2|}{x(T_1 - T_2)}$$



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Визуализация результатов в программе Origin: а) кинетика СВС (% от поверхности реакции) в) движение фронта волны СВС ; с) термограмма волны горения

Окончательно, для определения температуропроводности используем полученное в работе [6] соотношение:

$$a = \frac{1}{t} \left(\frac{x}{2y} \right)^2$$

Визуализация численных результатов, получаемых в ImageJ осуществляется в программе Origin, как показано на рис.5.

Таким образом, использование систем виртуальной пирометрии на базе программ Origin и ImageJ позволяет существенно расширять экспериментальные методы [7] исследования механизма формирования тепловой структуры в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evstigneyev V.V., Gulyaev P.Yu., Mukhachev A.B., Garkol D.A. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes // *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994, V. 30, № 1, P. 72-78.
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. 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.
4. Бороненко М.П., Гуляев П.Ю., Трифонов А.Л. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона с постоянной подачей порошка // *Вестник Югорского государственного университета*, 2012, № 2 (25), С. 16-20.
5. Gulyaev P.Yu., Gulyaev I.P., Cui Hongzhi, Milyukova I.V. In-situ selfpropagating-high-temperature-synthesis controlled by plasma // *Вестник Югорского государственного университета*, 2012, № 2 (25), С. 28-33.
6. Гуляев П.Ю., Евстигнеев В.В., Филимонов В.Ю. Температуропроводность реагирующих сред // *Перспективные материалы*, 1999, № 2, С. 73-77.
7. В.В.Евстигнеев, П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан, А.В. Калачёв Теоретические модели и экспериментальные методы исследования механизма формирования тепловой структуры в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / *Ползуновский вестник* №1 2005 , с. 313-320.

Гуляев Павел Юрьевич – д.т.н., профессор, тел.: (3467)-357-595, e-mail: gulyaev1954@mail.ru; **Бороненко Марина Петровна** – аспирантка.