УДК 681.772.7, 536.461

П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан, В.В. Мулярец

Trace-анализ дифференциальной хроноскопии волны горения СВС при высокоскоростной телевизионной регистрации

Влияние случайной структуры порошковой смеси исходных продуктов на движение фронта волны горения квазипериодически меняет температуру, скорость и направление распространения волны горения в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Задача анализа микрогетерогенной структуры горения, представляющая собой «проблему дискретности» СВС, вызывает необходимость разработки средств анализа локальной неустойчивости движения волны горения СВС. Решение данной проблемы авторы видят в применении математических методов сжатия видеоданных за счет введения в тракт обработки сигнала межкадровой разности и параметризации результатов дифференциальной хроноскопии (ДХС) с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), Trace-преобразования (ТП) или алгоритмов Хафа. Цель работы состоит в выборе признака для распознавания критических режимов распространения волны горения СВС по результатам применения преобразований БПФ и ТП к картам ДХС, полученным на основе данных высокоскоростной видеосъемки. В работе изложены методика и техника эксперимента с применением оптоэлектронных средств по видеорегистрации распространения волны горения СВС, особенности применения Trace-преобразования к картам ДХС. На основе анализа Trace-образов карт ДХС предложены статистические признаки для распознавания критического режима горения СВС. Произведено сравнение чувствительности распознавания изменения дискретности волны СВС с помощью предложенных статистических признаков для различных «ядер» функционалов Trace-преобразования карт ДХС. В результате такого сравнения определено наиболее эффективное из рассмотренных «ядер» функционалов Trace-преобразования, позволяющее определять неустойчивые режимы горения в технологии СВС.

Ключевые слова: высокоскоростная телевизионная регистрация, дифференциальная хроноскопия, Trace-преобразование, волна горения СВС.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-62-67

В настоящее время к важным прикладным направлениям развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) следует отнести его применение для разработки 3D-принтеров готовых изделий из металла и металлокерамики в области аддитивных технологий [1]. Основными контролируемыми параметрами являются температура и скорость распространения волны горения СВС по формованной порошковой смеси исходных продуктов реакции [2]. В результате влияния случайной структуры порошковой смеси исходных продуктов фронт волны горения квазипериодически меняет температуру, скорость и направление распространения [3], что вызывает необходимость разработки средств анализа локальной неустойчивости движения волны горения СВС. Традиционно, для слежения за случайной траекторией движения объекта успешно использовались телевизионно-измерительные системы на основе диссекторов [4], логическим развитием которых стали высокоскоростные streak-камеры наносекундного разрешения, применяющиеся для исследования быстропротекающих процессов горения [5] и распространения ударных волн [6].

Опыт применения отечественных телевизионных измерительных систем наносекундного разрешения [7, 8] для высокоскоростной регистрации процессов СВС показал, что они обладают высокими метрологическими характеристиками [9, 10], необходимых при контроле скорости и температуры волны горения [11, 12]. Вместе с тем, практическое применение телевизионно-измерительных систем на основе streak-камер затруднено ввиду невозможности обработки в режиме реального времени высокоскоростного видеопотока данных большого объема. Характерные масштабы времени формирования аддитивного слоя в волне СВС таковы, что при квазипериодической цикличности возникновения элементарного очага горения с периодом от 10 до 100 мс [13] время экзотермической реакции горения не превышает 1 мс [14], а эффективные времена тепловыделения и фазообразования не превышают 50-100 мкс [15].

Таким образом, любое понижение кадровой частоты или пространственное прореживание кадра приводят к потере контроля за переходом горения в критический режим, если периодичность регистрации не превышает на порядок характеристический масштаб эффектов локальной неустойчивости [16].

Эта задача анализа микрогетерогенной структуры горения получила название «проблемы дискретности» СВС, и в большинстве случаев решается экспериментальным путем потому, что выводы различных теоретических моделей о поведении волны горения на макроскопическом или микроскопическом уровне противоречат друг другу [17]. Пути решения данной проблемы авторы видят в применении математических методов сжатия видеоданных за счет введения в тракт обработки сигнала межкадровой разности и параметризации результатов дифференциальной хроноскопии (ДХС) с помощью алгоритмов типа быстрого преобразования Фурье (БПФ), Trace-преобразования (ТП) или алгоритмов Хафа [18].

Цель и задачи исследования

Целью работы является выбор признака для распознавания критических режимов распространения волны горения СВС по данным высокоскоростной видеосъемки. Для этого надо решить три задачи: предложить эффективный алгоритм понижения избыточности видеопотока на основе межкадровой разности; выбрать наиболее чувствительное к изменению технологического режима горения ядро Trace-преобразования; предложить статистические признаки для распознавания критического режима горения СВС.

Методика и техника эксперимента

Для регистрации распространения волны горения СВС использовался оптико-электронный комплекс микропирометрии наносекундного разрешения на базе сверхскоростной телевизионной камеры «ВидеоСпринтNG» (ЗАО НПК Видеоскан, Россия) с электронно-оптическим преобразователем-фотоумножителем на микроканальной пластине и оптическим затвором «Nano-Gate» [8]. Телевизионные измерительные комплексы на основе высокоскоростных CMOS-фотоматриц, использующие в канале оптико-электронного преобразования функциональные режимы мультиэкспозиции и «глобального затвора» [9], значительно расширяют возможности изучения быстрых процессов горения СВС за счет многократной регистрации изображения движущегося объекта с наносекундными задержками между кадрами [10]. Волна горения исследовалась в хорошо изученной системе Ni-Al эквимолярного состава [19] с инертными добавками конечного продукта реакции в массовом соотношении от 0 до 30% с шагом в 2,5%. Это позволило осуществить управляемый переход на неустойчивые режимы горения.

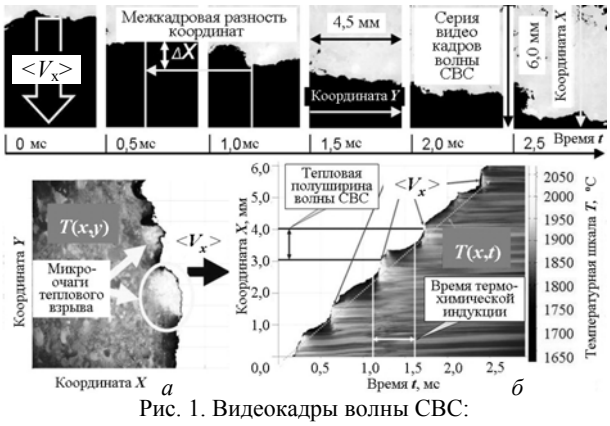

Рис. 1. Видеокадры волны СВС:
а – поле температур $T(x, y)$ в одном кадре;
б – температурная хронограмма $T(x,t)$ и движение фронта волны $X = f(t)$ вдоль одной строки

На рис. 1 показан пример высокоскоростной микро-видеосъемки, причем, на рис. 1, *а* приведен один кадр с полем температур $T(x, y)$ волны горения в момент времени t, а на рис. 1, *б* принцип измерения средней скорости волны горения $<V_x>$ вдоль выделенной строки с координатой Y [11]. Высокое пространственное разрешение (1200x800 pxl), малое время мультиэкспозиции (30 ns) и межкадровый интервал ($\Delta t \leq 1$ ms) обеспечивают подробную визуализацию тонкой тепловой структуры волны горения СВС [12].

Компьютерное моделирование

Видеопоток данных сверхскоростной телевизионной камеры «ВидеоСпринтNG» управляется библиотечными функциями специализированной программы изображений ImageJ (National Institutes of Health, USA) с открытым исходным кодом, предназначенной для анализа и обработки научных многомерных изображений. Для сжатия данных авторами был использован метод дифференциальной хроноскопии (ДХС), представляющий собой модифицированный алгоритм вычисления межкадровой разности [13]. По температурной хронограмме $T(x, t)$, приведенной на рис. 1, *б*, определялся порог бинаризации изображения температурного поля в волне горения СВС таким образом, чтобы надежно выделялась граница волнового фронта. В нашем случае пороговое значение выбиралось равным 1638 ºС, что в фазовой диаграмме растворимости системы Ni-Al соответствует температуре перетектического распада интерметаллида Ni_1Al_1. В результате пороговой бинаризации видеокадров вместо потока видеоданных с большим объемом и существенной избыточностью для каждого кадра получаем вектор значений $X(t, y)$ – координат фронта волны СВС, где t – время кадра, y – номер строки. Конечный результат 2D-визуализации скорости теплопереноса волны СВС получен путем вычисления межкадровой разности координат $\Delta X(t, y) = X(t, y) - X(t - \Delta t, y)$ волнового фронта по всей серии тепловизионных видеокадров и приведен на рис. 2. Очевидно, что структура ДХС более упорядочена во времени и позволяет судить о пространственной и временной «когерентности» волны СВС.

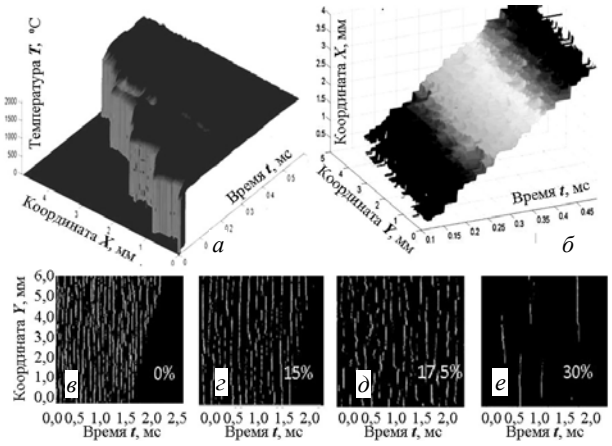

Рис. 2. Методика получения ДХС волны горения:
а – $T(x, t)$ строки; *б* – координаты фронта $X(t, y)$ по всем строкам; *в* – карта ДХС чистых продуктов горения;
г и *д* – карты ДХС с 15–17% инерта; *е* – карта ДХС с 30% инерта характеризует неустойчивый режим

Постановка задачи компьютерного моделирования для идеализированных режимов СВС основывалась на пространственно-временной структуре экспериментальных карт ДХС и дополнительных усло-

вий химической физики горения в виде критерия Юм-Розери, согласно которому траектория химической реакции становится неустойчивой при нарушении стехиометрии более, чем на 15%. В нашем случае, это экспериментально подтверждается на примере введения примесей в виде инертных или легирующих добавок [19], как видно из рис. 2, *г* и *д*. Как было установлено ранее [3], дискретность тепловой структуры СВС в этом случае прямо пропорциональна массовой доле добавок в пределах до 12–15%, а выше – волна распадается, горение становится локально неустойчивым и переходит в затухающий или пульсирующий эстафетный режим. Для выявления переходных режимов СВС был выбран метод распознавания образов на основе Trace-преобразования [20], хорошо зарекомендовавший в решении аналогичных задач определения инвариантов высокоскоростных выбросов в технологиях плазменно-дугового напыления [21]. Имитационная модель карты (матрицы) ДХС волны горения СВС в условиях разбавления исходной смеси инертной добавкой была откалибрована по приведенным выше экспериментальным данным и приведена на рисунке 3 вместе с примерами их матричных Trace-образов для «типовых» функционалов T_3, T_4 и T_5, соответствующих различным гармоникам преобразования Радона-Никодима [20]:

$$T_3: \quad T(f(t)) = \left| \int_{c^*}^{\infty} e^{i5\log(r)} r f(t) dt \right|,$$

$$T_4: \quad T(f(t)) = \left| \int_{c^*}^{\infty} e^{i3\log(r)} f(t) dt \right|,$$

$$T_5: \quad T(f(t)) = \left| \int_{c^*}^{\infty} e^{i4\log(r)} \sqrt{r} f(t) dt \right|.$$

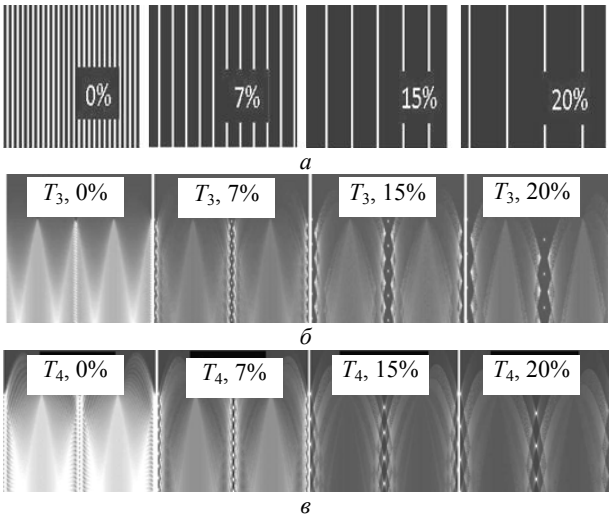

Рис. 3. Модель волны горения: *а* – ДХС с инертной добавкой 0%, 7%, 15%, 20%; *б* – Trace-образы функционала T_3; *в* – Trace-образы функционала T_4

Функционал Trace-преобразования (например, T_3, T_4 или T_5) интегрирует значения яркостей $f(t)$ точек карты ДХС вдоль проекционного направления t, повернутого на положительный угол φ относительно вертикальной оси карты ДХС и отстоящего на расстояние r от центра карты (матричного изображения) ДХС. То есть, на рис. 3, *б* и *в* (а также и на рис. 4) вертикальная координата (номер строки матричного Trace-образа) соответствует r, а горизонтальная координата (номер столбца матричного Trace-образа) – углу поворота φ, изменяющемуся от 0 до 360° (возможный наименьший шаг – 1°).

Как видно из рис. 3, от выбора Trace-функционала зависит чувствительность распознавания при изменении дискретности волны СВС: для T_3 характерны веерные структуры; T_4 распознает наклон волны; T_5 отслеживает параболический профиль теплопереноса. Для выявления наилучшей чувствительности распознавания критического режима горения при достижении 15% разбавления инертом был проведен анализ последовательности разностей между матрицей «базового» Trace-образа (0% примеси-инерта) и матрицей очередного текущего Trace-образа (соответствующего следующим текущим значениям процента разбавления инертом: 1, 7, 15, 20%) – анализ разностей Trace-образов относительно «базового» Trace-образа (рис. 4, *а*). Также был проведен анализ последовательности разностей между матрицами «смежных (соседних)» Trace-образов (соответствующих парам значений процента разбавления инертом: 0 и 1; 6 и 7; 14 и 15; 19 и 20%) – анализ разностей «смежных» Trace-образов (шаг добавки в 1%, рис. 4, *б*).

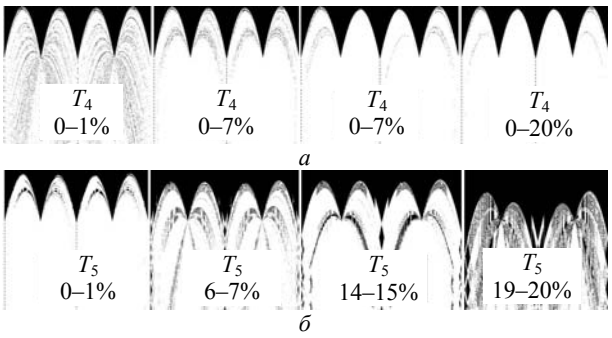

Рис. 4. Дифференциальный анализ чувствительности: *а* – анализ разностей Trace-образов относительно «базового» Trace-образа на основе функционала T_4; *б* – анализ разностей «смежных» Trace-образов на основе функционала T_5

Обсуждение результатов

Результаты двух вариантов анализа (рис. 4, *а* и *б*) дают возможность проведения статистического анализа поведения их гистограмм яркости по мере увеличения инертной добавки с 0 до 20% (рис. 5).

Очевидными признаками поведения гистограмм (рис. 5), полученных в ходе анализа разностей «смежных» Trace-образов, является уменьшение в 3 раза амплитуды распределения для функционала T_4 и смещение среднего значения яркости для функционала T_5 при анализе разностей Trace-образов относительно «базового» Trace-образа. Функционал T_3

следует признать наименее эффективным для решения задач распознавания критических режимов СВС.

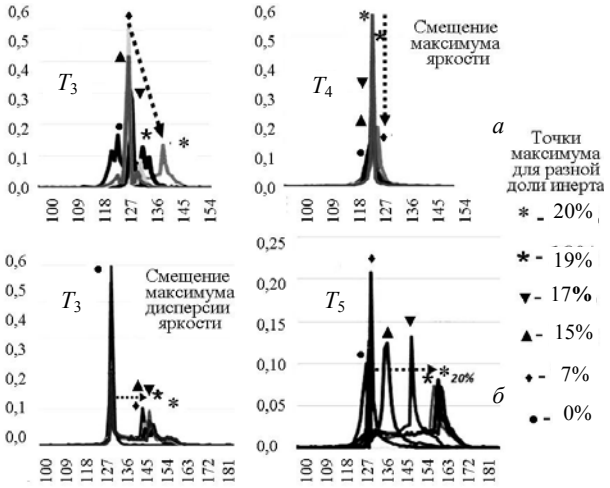

Рис. 5. Статистические признаки распознавания критических условий горения СВС: *а* – «амплитудный» для анализа разностей «смежных» Trace-образов; *б* – «дисперсионный» признак для анализа разностей Trace-образов относительно «базового» Trace-образа

Выводы

Выявленные отличия позволяют создавать базу данных об инвариантах Trace-преобразования, соответствующих неустойчивым режимам горения в процессе СВС.

Перспективы

1. Применение ДХС для анализа волны горения позволяет ввести понятие «когерентности» процесса СВС.
2. Повышение чувствительности Trace-анализа открывает возможность исследовать процессы структурообразования СВС in situ.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Югорского государственного университета: А.В. Долматову, к.т.н., доценту и М.П. Бороненко, к.т.н. за предоставленные результаты регистрации волны горения СВС и предварительную обработку видеоданных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-08-01475, № 18-41-22004 и проекта № 13-01-20/28 ВНШ ЮГУ.

Литература

1. Evstigneev V.V. Development Prospects of SHS Technologies in Altai State Technical University / V.V. Evstigneev, I.V. Miljukova, V.D. Goncharov, V.A. Vagner, A.A Gladkih // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2006. – Vol. 15, No. 1. – P. 99–104.

2. Evstigneyev V.V. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes / V.V. Evstigneyev, A.B. Mukhachev, D.A. Garkol., P.J. Guljaev // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1994. – Vol. 30, No. 1. – P. 72–78.

3. Калачев А.В. Исследование тепловой структуры волны горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.В. Калачев, П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан // Изв. Алт. гос. ун-та. – 2005. – № 1 (45). – С. 104–109.

4. Казанцев Г.Д. Измерительное телевидение: учеб. пособие для вузов / Г.Д. Казанцев, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский. – М.: Высш. шк., 1994. – 228 с.

5. Nagase K. Spectroscopic Analysis of Diesel Combustion Flame by Means of Streak Camera / K. Nagase, K. Funatsu, I. Haga // Lecture Theses of the 7 th International Combustion Engine Symposium, Japan. – 1988. – No. 123.

6. Shepard C.L. Measurements of lateral thermal smoothing of 0.53 μm laser intensity nonunitormities via shock-wave analysis / C.L. Shepard, P.M. Campbell // Physical Review A. – 1989. – Vol. 39, No. 3. – P. 1344–1350.

7. Бороненко М.П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев // Доклады ТУСУР. – 2014. – №1 (31). – С. 60–64.

8. Бебия А.Г. Оптико-электронный комплекс для микропирометрии наносекундного разрешения / А.Г. Бебия, А.Е. Серегин, М.П. Бороненко // Современная техника и технологии: сб. тр. XXI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 5–9 октября, Томск, 2015. – С. 246–248.

9. Boronenko M.P. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / M.P. Boronenko, A.E. Seregin, K.G. Poluhina, P.Yu. Gulyaev // JPCS. – 2015. – Vol. 643. – Article Id 012028.

10. Borodina K.A. Per-pixel adjustment of the afterglow effect EOC screen / K.A. Borodina, S.A. Sorokina, A.G. Bebiya, M.P. Boronenko // JPCS. – 2016. – Vol. 741, No. 1. – Article Id 012139.

11. Boronenko M.P. Increasing accuracy of high temperature and speed processes micropyrometry / M.P. Boronenko, A.G. Bebiya, P.Yu. Gulyaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 93, No 1. – Article Id 012021.

12. Boronenko M.P. Phase formation time evaluation in NiAl combustion systems by the thermal fields visualization method / M.P. Boronenko, A.E. Seregin, I.V. Milyukova, P.Yu. Gulyaev // Scientific Visualization. – 2015. – Vol. 7, No 5. – P. 102–108.

13. Cui H.Zh. The Temperature Control in the Combustion Wave SHS / H.Zh. Cui, P.Yu. Gulyaev // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов: сб. научных статей VI Международ. научно-практ. конференции, 11–12 марта 2016 г. – Барнаул: изд-во Алт. гос. ун-та, 2016. – С. 207–211.

14. Gulyaev P.Yu. Plasma spraying of protective coatings from ferromagnetic SHS-materials // International Research Journal. – 2013. – No. 12-1 (19). – P. 74–77.

15. Gulyaev P.Yu. Temperature measurements for Ni-Al and Ti-Al phase control in SHS Synthesis and plasma spray processes / P.Yu. Gulyaev, I.P. Gulyaev, I.V. Milyukova, H.-Z. Cui // High Temperatures - High Pressures. – 2015. – Vol. 44, No. 2. – P. 83–92.

16. Иордан В.И. Комплекс методов цифровой обработки изображений для исследования эффектов локальной неустойчивости и нестационарности волны горения процесса СВС / В.И. Иордан, П.Ю. Гуляев, В.В. Евстигнеев // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4-1. – С. 152–170.

17. Wright A. The Discrete Regime of Flame propagation in Metal particulate clouds / A. Wright, A.J. Higgins, S. Goroshin // Combustion Science and Technology. – 2016. – Vol. 188, No. 11-12. – P. 2178–2199.

18. Иордан В.И. Модернизация программно-аппаратного обеспечения высокоскоростной интеллектуальной

видеокамеры / В.И. Иордан, И.К. Рябченко // Вестник Югорского гос. ун-та. – 2014. – № 2(33) . – С. 74–80.

19. Song X.-J. Microstructure and evolution of (TiB_2+Al_2O_3)/NiAl composites prepared by self-propagation high-temperature synthesis / X.-J. Song,·H.-Z. Cui,·L.-L. Cao, P.Y. Gulyaev // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26, № 7. – P. 1878–1884.

20. Kadyrov A. The Trace Transform and its applications / A. Kadyrov, M. Petrou // IEEE Trans. PAMI. – 2001. – Vol. 23(8). – P. 811–828.

21. Gulyaev P.Yu. Trace-transform invariants of tracks of high-velocity jets from the surface of tungsten droplets in the plasma flow / P.Yu. Gulyaev, V.I. Jordan, I.P. Gulyaev, A.V. Dolmatov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 830. – Article ID 012151.

Гуляев Павел Юрьевич
Д-р техн. наук, профессор каф. физики общетехнических дисциплин (ФОТД) Югорского государственного ун-та (ЮГУ)
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, Россия, 628012
ORCID 0000-0002-4337-1253
Тел.: +7 (346-7) 37-57-97
Эл. почта: P_Gulyaev@ugrasu.ru

Иордан Владимир Иванович
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. вычислительной техники и электроники (ВТиЭ)
Алтайского государственного ун-та (АлтГУ)
Ленина пр-т, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049
ORCID 0000-0002-6309-7271
Тел.: +7-960-937-89-00
Эл. почта: jordan@phys.asu.ru

Мулярец Василий Васильевич
Студент группы 573М ААлтГУ
Ленина пр-т, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049
Тел.: +7-961-993-89-89
Эл. почта: dardvas@gmail.com

Gulyaev P.Yu., Jordan V.I., Mulyarets V.V.

Trace-analysis of differential chronoscopy of the SHS combustion wave by high-speed television recording

The influence of the random structure of the powder mixture of the initial products on the motion of the front of the combustion wave quasiperiodically changes the temperature, velocity, and direction of propagation of the combustion wave in the process of self-propagating high-temperarure synthesis (SHS). The task of analyzing the microheterogeneous combustion structure, which is a «discreteness problem» for SHS, calls for the development of means for analyzing the local instability of the motion of the SHS combustion wave. The solution to this problem is seen in the application of mathematical methods for compressing video data by introducing the interframe difference into the signal processing path and parametrizing the results of differential chronoscopy (DCS) using Fast Fourier transform (FFT), Trace transform (TT) or Hough algorithms. The aim of the paper is to select a characteristic for recognizing the critical modes of propagation of the SHS combustion wave based on the results of applying FFT and TT transformations to DCS maps obtained on the basis of high-speed video data. The paper describes the methodology and technique of the experiment with the use of optoelectronic means for video recording of the propagation of the SHS combustion wave, the peculiarities of applying of Trace transform to DCS maps. Based on the analysis of Trace-images of DCS maps, statistical characteristics are proposed for recognizing the critical combustion regime of SHS. The sensitivity of recognition of the change in the discreteness of the SHS wave is compared by means of the proposed statistical characteristics for different functional "kernels" of the Trace transform of the DCS maps. As a result of this comparison, the most effective of the considered functional "kernels" of the Trace transform was determined, which makes it possible to determine the instable combustion regimes in the SHS technology.

Keywords: high-speed television recording, differential chronoscopy, Trace transform, SHS combustion wave.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-62-67

References

1. Evstigneev V.V., Miljukova I.V., Goncharov V.D., V.A. Vagner, A.A Gladkih Development Prospects of SHS Technologies in Altai State Technical University. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2006, vol. 15, no. 1. pp. 99–104.

2. Evstigneyev V.V., Mukhachev A.B., Garkol D.A., P.J. Guljaev A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 72–78.

3. Kalachev A.V., Gulayev P.Yu., Jordan V.I. Investigation of the thermal structure of the combustion wave of self-propagating high-temperature synthesis. *The «Izvestiya of Altai State University» Journal*, 2005, vol. 45, no. 1, pp. 104-109 (In Rus.).

4. Kazantsev G.D., Kuryachiy M.I., Pustynsky I.N. Izmeritelnoe televidenie: uchebnoe posobie dlya vuzov [Measuring television: textbook for high schools]. Moscow, @High school@ Publ., 1994. 228 p. (In Rus.).

5. Nagase K., Funatsu K., Haga I. Spectroscopic Analysis of Diesel Combustion Flame by Means of Streak Camera. *Lecture Theses of the 7 th International Combustion Engine Symposium*, Japan, 1988, no. 123.

6. Shepard C.L., Campbell P.M. Measurements of lateral thermal smoothing of 0.53 μm laser intensity nonunitormities via shock-wave analysis. *Physical Review A*, 1989, vol. 39, no. 3, pp. 1344–1350.

7. Boronenko M.P., Gulyaev P.Yu. TV measuring system of nanosecond resolution. *Proceedings of TUSUR Journal,* 2014, vol. 31, no. 1, pp. 60–64 (In Rus.).

8. Bebiya A.G., Seregin A.E., Boronenko M.P. *Optiko-elektronny complex dlya mikropirometrii nanosekundnogo razresheniya* [Optoelectronic complex for micropyrometry of nanosecond resolution]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. Sbornik trudov XXI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, 5–9 oktyabrya* [Modern technique and technology. Proc. of the XXI International scientific and practice conference of students, graduate students and young scientists, October 5–9]. Tomsk, 2015, pp. 246–248.

9. Boronenko M.P., Seregin A.E., Poluhina K.G. , Gulyaev P.Yu. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter. *JPCS*, 2015, vol. 643, Article Id 012028.

10. Borodina K.A., Sorokina S.A., Bebiya A.G., Boronenko M.P. Per-pixel adjustment of the afterglow effect EOC screen. *JPCS*, 2016, vol. 741, no 1, Article Id 012139.

11 Boronenko M.P., Bebiya A.G., Gulyaev P.Yu. Increasing accuracy of high temperature and speed processes micropyrometry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 93, no. 1, Article Id 012021.

12. Boronenko M.P., Seregin A.E., Milyukova I.V., Gulyaev P.Y. Phase formation time evaluation in NiAl combustion systems by the thermal fields visualization method. *Scientific Visualization*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 102–108.

13. Cui H.Zh., Gulyaev P.Yu. The Temperature Control in the Combustion Wave SHS. *Multi-core processors, parallel programming, FPGA, signal processing systems*. Proc. of the VI International scientific and practice conference, March 11-12, Barnaul, 2016, ISSN 2313-6111, pp. 207–211 (In Rus.).

14. Gulyaev P.Yu. Plasma spraying of protective coatings from ferromagnetic SHS-materials. *International Research Journal*, 2013, vol. 19, no. 12-1, pp. 74–77.

15. Gulyaev P.Yu., Gulyaev I.P., Milyukova I.V., Cui H.-Z. Temperature measurements for Ni-Al and Ti-Al phase control in SHS Synthesis and plasma spray processes. *High Temperatures - High Pressures*, 2015, vol. 44, no. 2, pp. 83–92.

16. Jordan V.I., Gulyaev P.Yu., Evstigneev V.V. A complex of methods for digital image processing to study the effects of local instability and nonstationary combustion of the SHS process. *Polzunov Bulletin*, 2005, no. 4-1, pp. 152–170 (In Rus.).

17. Wright A., Higgins A.J., Goroshin S. The Discrete Regime of Flame propagation in Metal particulate clouds. *Combustion Science and Technology*, 2016, vol. 188, no. 11–12, pp. 2178–2199.

18. Jordan V.I., Ryabchenko I.K. Upgrading of the hardware and software of the high-speed intelligent video camera. *Yugra State University Bulletin*, 2014, vol. 33, no. 2, pp. 74–80 (In Rus.).

19. Song X.-J., Cui H.-Z.,·Cao L.-L., Gulyaev P.Yu. Microstructure and evolution of (TiB_2+Al_2O_3)/NiAl composites prepared by self-propagation high-temperature synthesis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26, no. 7, pp. 1878–1884.

20. Kadyrov A., Petrou M. The Trace Transform and its applications. *IEEE Trans. PAMI*, 2001, vol. 23, no. 8, pp. 811–828.

21. Gulyaev P.Yu., Jordan V.I., Gulyaev I.P., Dolmatov A.V. Trace-transform invariants of tracks of high-velocity jets from the surface of tungsten droplets in the plasma flow. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 830, Article ID 012151.

Pavel Yu. Gulyaev
Doctor of Engineering Sciences, professor,
Department of Physics of General Technical Disciplines,
Ugra State University
16, Chekhova st., Khanty-Mansiysk, Russia, 628012
ORCID: 0000-0002-4337-1253
Phone.: +7 (346-7) 37-57-97
Email: P_Gulyaev@ugrasu.ru

Vladimir I. Jordan
PhD of Physics and Mathematics, Assistant Professor,
Department of Computing Techniques and Electronics
Altai State University
61, Lenina prosp., Barnaul, Russia, 656049
ORCID 0000-0002-6309-7271
Phone.: +7-960-937-89-00
Email: jordan@phys.asu.ru

Vasiliy V. Mulyarets
Student of Group 573M,
Altai State University
61, Lenin Av., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-961-993-89-89
Email: dardvas@gmail.com