

## EXPERIMENTAL STUDY OF SOLID-FLAME COMBUSTION BY THE Ni-AL SYSTEM METHOD OF HIGH-SPEED VIDEO FILMING

L. Atyuckaya, student  
A. Bebiya, student  
M. Boronenko, postgraduate student  
Ugra State University, Russia

Authors present results of the experimental study of a wave of combustion in powder mixes of the Ni-Al system with the help of the of high-speed video filming method. Characteristic spatial-temporal scales of the thermal structure of the SHS wave and temperature dynamics in a local point were determined on the basis of the received data.

**Keywords:** self-extending high-temperature synthesis, thermogram, reaction cell, brightness pyrometry, temperature field.

Conference participants, National championship  
in scientific analytics

Одним из способов получения наноструктурированных материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Совокупность возможных направленных воздействий на реакционную среду и их комбинации определяет множество вариантов реализации операций технологического горения и соответствующее разнообразие полученных веществ. Таким образом, для получения материалов с заданными свойствами, необходимо осуществлять контроль за процессами горения, а именно, температурой и скоростью распространения фронта горения.

Детальное исследование механизма взаимодействия СВС-систем требует применения комплексных методик эксперимента дополняющих друг друга. В качестве экспериментальной методики исследования СВ-синтеза может рассматриваться метод и аппаратура яркостной пирометрии высокого разрешения, впервые примененный к изучению закономерностей и механизма реакций в системе Ni-Al [1-2, 7-8].

Высокоскоростная микровидеосъемка позволяет наблюдать процесс горения с временным разрешением  $10^{-3}$  с, и пространственным порядка 100 мкм.

Так как реакция СВС протекала в пробирке, имеющей диаметр, близкий к критическому и теплоотвод через боковую поверхность существенен, то система уравнений, описывающих стационарное распространение волны имеет вид (1):

– уравнение теплопроводности;

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) - mc \frac{\delta T}{\delta x} + \Theta - \frac{2\alpha}{d} (T - T_0) - \frac{2\varepsilon \delta T^4}{d} = 0;$$

– уравнение полноты реакции;

$$-m \frac{\delta \eta}{\delta x} + \frac{\Theta}{Q} = 0;$$

– при граничных условиях:

$$x = -\infty; \quad T = T_0, \quad \frac{\delta T}{\delta x} = 0, \quad n = 0;$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ СИСТЕМЫ Ni-AL МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

Атюцкая Л.Ю., студент  
Бебия А.Г., студент  
Бороненко М.П., аспирант  
Югорский государственный университет, Россия

В статье представлены результаты экспериментального исследования волны горения в порошковых смесях системы Ni-Al с помощью применения метода скоростной киносъемки. На основе полученных данных определялись характерные пространственно-временные масштабы тепловой структуры волны СВС и температурная динамика в локальной точке.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термограмма, реакционная ячейка, яркостная пирометрия, температурное поле.

Участники конференции, Национального первенства  
по научной аналитике

$$x = +\infty; \quad T = T_0, \quad \frac{\delta T}{\delta x} = 0, \quad n = 1.$$

где  $\lambda = \lambda(\eta)$  – уравнение зависимости теплопроводности зоны горения от степени полноты реакции;  $m$  – массовая скорость горения;  $c$  – теплопроводность;  $\eta$  – степень полноты реакции,  $\varepsilon$  – коэффициент излучения реакционной зоны;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $Q$  – теплота реакции,  $T_0$  – начальная температура,  $d$  – диаметр образца,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\Theta$  – скорость тепловыделения. В условиях высоких градиентов температур конвективным теплообменом можно пренебречь.

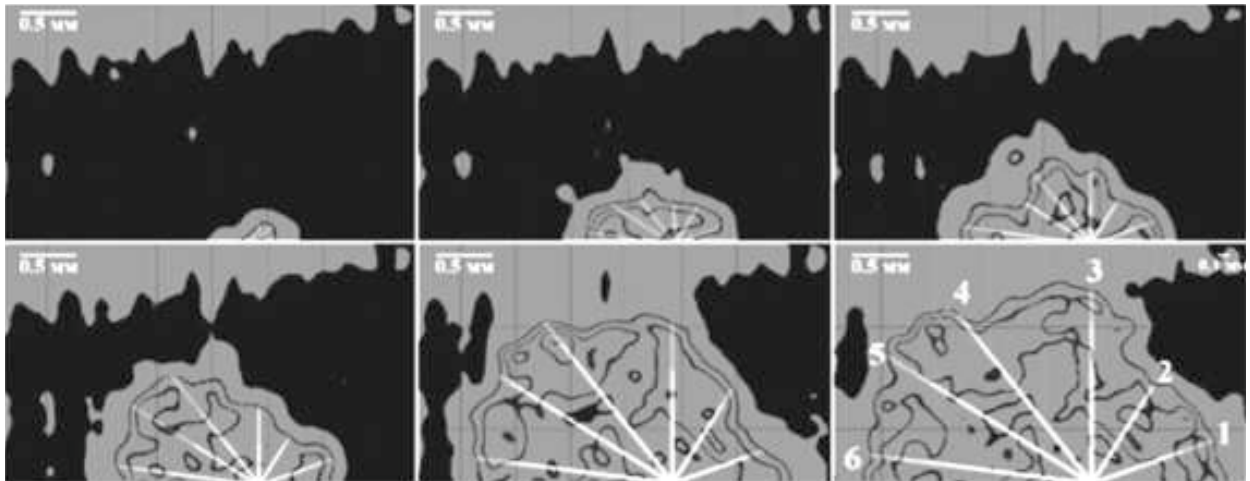
Наблюдение процесса горения СВС показало, что на начальной стадии развитие первичного одиночного очага привело к распространению фронта волны, имеющего форму, близкую к полусфере, скорость фронта примерно одинаковая во всех направлениях. Этот режим предусматривает наличие большого количества частиц реагентов в зоне инертного прогрева, так что их характеристики могут быть усреднены, и гетерогенная система заменяется гомогенной с этими усредненными свойствами.

Однако по мере продвижения фронта волны горения, симметричная форма искажается, что предопределяет направление фронта волны в дальнейшем (рис. 1). После окончания переходного процесса наблюдается:

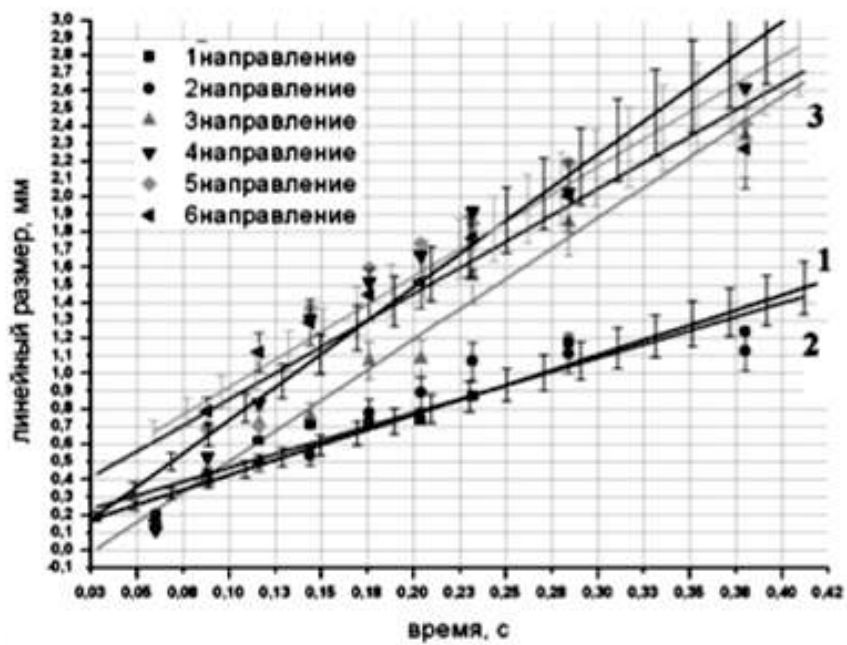
– воспламенение и сгорание отдельной частицы (реакционной ячейки) с характерным временем, – быстрое распространение фронта;

– задержка воспламенения, в течение которой имеет место прогрев соседней реакционной ячейки, – фронт волны неподвижен.

Таким образом, реализуется иной механизм распространения волны реакции – эстафетный или сцинтилляционный, в котором медленные периоды распространения тепла (стагнация фронта горения) сменяются активными периодами химического реагирования, сопровождающимися локальным повышением температуры (вспышка – сцинтилляция) и быстрым продвижением фронта. При этом ширина зоны реакции сравнима с масштабом гетерогенности среды (рис. 2).

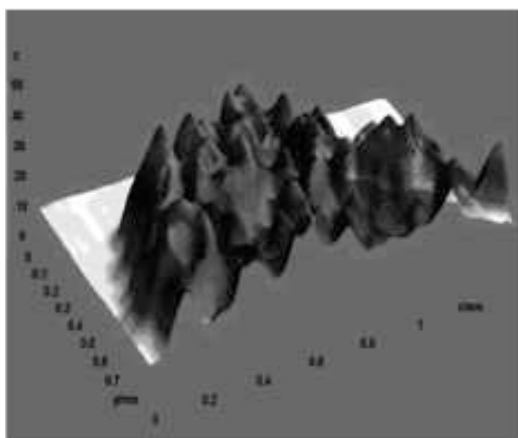


а)

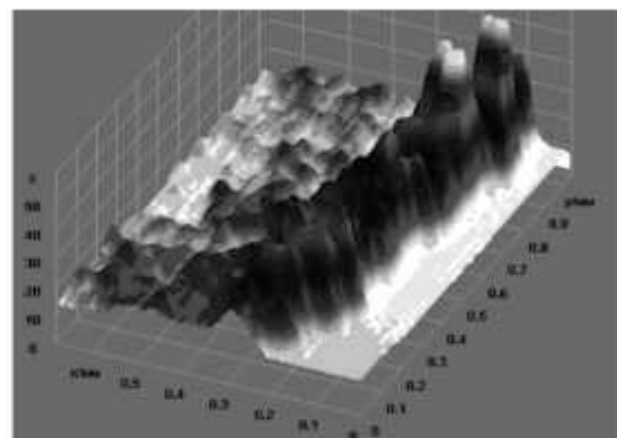


б)

Рис. 1: а) Последовательные изображения градиентного поля волны горения с выбранными направлениями; б) График изменения координаты фронта волны в зависимости от времени при переходе от гомогенного режима горения к эстафетному



а)



б)

Рис. 2: а) 3D-модель квазигомогенного режима горения CBC; б) 3D-модель CBC в эстафетном режиме горения

В рамках моделей механики сплошных сред перенос тепла в нестационарном случае описывается уравнением (2):

$$\alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{C(T)\rho} = \frac{\partial T}{\partial t},$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $C(T)$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность образца;  $q_v$  – источник тепловыделения. Величину тепловыделения можно определить с помощью следующего выражения (3):

$$Q = \frac{W \cdot \rho \cdot v}{\Delta z \cdot n} \text{ Вт/м}^3,$$

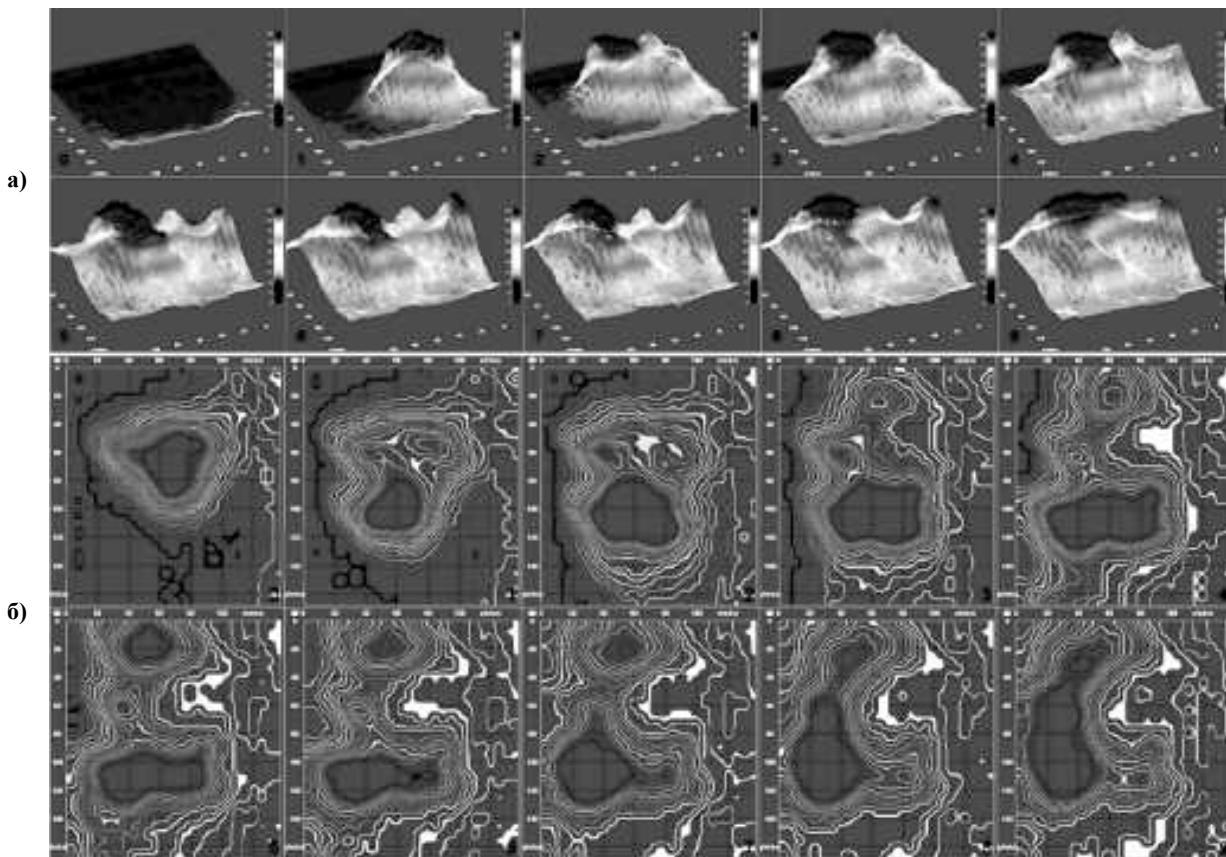
где  $W$  – энергетический выход химической реакции, Дж/кг;  $\rho$  – реальная плотность образца, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость распространения волны, м/с;  $n$  – ширина зоны горения;  $\Delta z$  – толщина волны горения, м.

Компьютерная обработка последовательных кадров СВС-горения в сканнирующем режиме позволяет определить мгновенное значение координат точек, составляющих линию фронта горения. Мгновенные значения скоростей в некоторых точках (рис. 3, а) поверхности образца исходя из термограмм горения СВС (рис. 3, б) дают разброс значений от  $V = 1,4$  мм/с, до  $V = 21,7$  мм/с. Причем, эти же высокоскоростные области являются и самыми высокотемпературными. Максимальная температура горения смеси, в соответствии с представлениями модели горения второго рода, должна лимитироваться темпера-

турой плавления наиболее тугоплавкого элемента смеси, т.е. никеля [4]. Однако, анализ динамики температурных полей областей реакции СВ-синтеза показал наличие горячих очагов со сверхадиабатической яркостной температурой 1760 °С.

Превышение этой температуры можно объяснить переизлучением в порах, которое как известно, зависит от их геометрии. Так как форма пор в процессе СВС изменяется, то яркостная температура будет непостоянной. Исходя из анализа термограмм и наложений изолиний температурного поля и соответствующих областей насыпки и продукта реакции (рис. 4), можно следующее сделать следующие выводы:

1. Высокотемпературная зона зарождается на частицах никеля.
2. После того как прошла СВС-реакция, на месте высокотемпературной области есть полость.
3. В наблюдаемой высокотемпературной области поверхность частицы никеля, окруженная расплавом алюминия, образует реакционную ячейку.
4. Самая высокотемпературная область располагается вдоль границы реакционной ячейки, следовательно, в основном, там и протекают химические реакции.
5. Динамика реакционной ячейки (очага), показывает, что зарождение новых соединений (зародышей) происходит на выпуклых границах частицы никеля, контактирующей с расплавом алюминия (реакционной ячейки), с их последующим вытеснением в расплав [3-6].



**Рис. 3:** а) Динамика температурного поля реакционной ячейки, в которых яркостная температура достигает 1704 °С; б) Зарождение новых соединений с их последующим вытеснением в расплав (вид в изолиниях температурного поля)

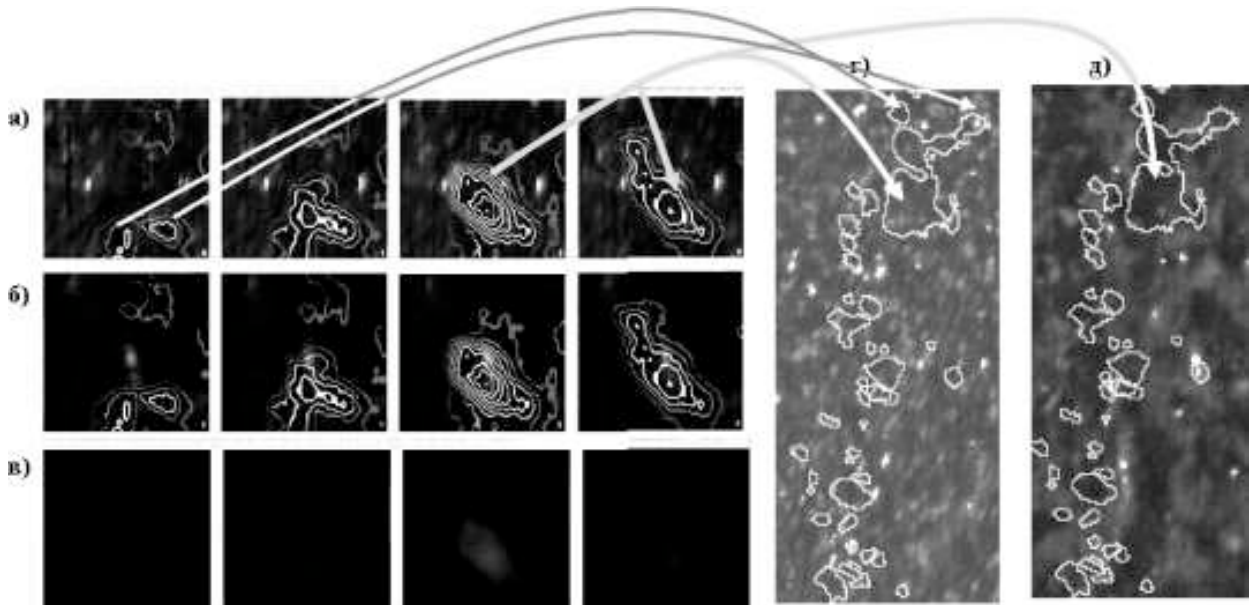


Рис. 4: Идентификация областей:

- а) наложение градиентного поля высокотемпературной области и той же области на насыпке (оригинал);
- б) наложение градиентного поля высокотемпературной области и той же области на продуктах реакции (оригинал); в) Последовательность кадров (оригинал) с высокотемпературной областью, для которых были построены градиентные поля; г) сопоставление контуров сверхадиабатических очагов с нескольких кадров с исходной шихтой д) сопоставление контуров сверхадиабатических очагов с нескольких кадров с конечной структурой образца

Даже в случае идеального контакта между частицами для реальной гетерогенной системы необходимо предположить, что предварительное смешение компонентов приводит к возможности выделения минимального объема реакционной среды с заранее заданным (например, стехиометрическим) соотношением реагентов. Этот минимальный объем реагентов и есть элементарная реакционная ячейка. Механизм взаимодействия внутри такой ячейки и ее размеры определяют специфику реагирования в той или иной системе твердопламенного горения (рис. 5). Исследуя градиентное поле температур реакционной ячейки можно видеть, что существует неоднородность температур внутри реакционных ячеек. Размеры области реакционной ячейки порядка  $100 \times 100$  мкм. При построении модели реакционной ячейки, можно выделить область порядка  $50 \times 50$  мкм, имеющую близкую по значению температуру. В данном случае можно в дальнейшем проверить точность соответствия модели [9, 10], в которой структура

среды представлялась как набор цилиндрических элементов, сечение которых характеризуется масштабом  $d$ . Часть этих элементов случайным образом удалялась, так чтобы количество образовавшихся пустот соответствовало заданной пористости среды. Если на такую среду наложить сетку с квадратными ячейками со стороной  $d/2$ , то это приведет к формированию трех основных типов элементарных ячеек: 1 – «ядро», 2 – «поры» и 3 – «контакт». В этих ячейках преобладают различные механизмы теплопроводности: 1 – кондукция по твердому телу; 2 – лучистый перенос через поры; 3 – контактная теплопроводность. Каждая ячейка  $(i, j)$  обменивается теплом с соседями по закону (3):

$$[cp]^{(i,j)} \frac{\partial T^{(i,j)}}{\partial t} = \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|^{(i+\frac{1}{2},j)} - k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|^{(i-\frac{1}{2},j)} \right) \frac{1}{\Delta x} + \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|^{(i,j+\frac{1}{2})} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|^{(i,j-\frac{1}{2})} \right) \frac{1}{\Delta y} + Q_p \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|^{(i,j)},$$

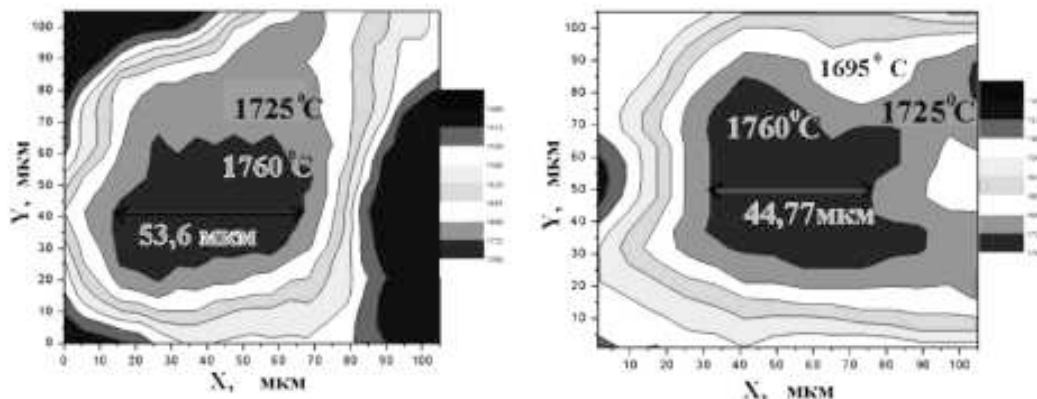


Рис. 5. Модель реакционных ячеек, в которых максимальная яркостная температура достигает  $1760^\circ\text{C}$ : а) квазигомогенное горение; б) спиновое горение

где

$$k_x \Big|_{(i+\frac{1}{2},j)} = \frac{2k_x^{(i+1,j)}k_x^{(i,j)}}{k_x^{(i+1,j)} + k_x^{(i,j)}},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{(i+\frac{1}{2},j)} = \frac{2(T^{(i+1,j)} - T^{(i,j)})}{d}.$$

Аналогично для  $y$ . Реакция начинается, когда реакционная ячейка прогревается до некоторой заданной температуры  $T_{ign}$  и затем протекает очень быстро (4):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = k_0 H(T - T_{ign}) H(1 - \eta),$$

$$k_0 = \frac{1}{t_r} = \text{const};$$

$H(x)$ -функция Хевисайда. Такая модель позволяет напрямую сравнить расчетные данные с результатами экспериментов по микроструктуре волны горения, полученные высокоскоростной микровидеосъемкой процесса горения.

### References:

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., Иордан В.И., Калачёв А.В. Теоретические модели и экспериментальные методы исследования механизма формирования тепловой структуры в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Позуновский вестник 2005. №1-с. 313-320
3. 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.

4. Евстигнеев В.В., Милюкова И.В., Гуляев И.П., Соломенцев С.Ю., Амброськин И.Е. Влияние инертных добавок на теплофизические характеристики СВ-синтеза в системе Ni-Al. // Труды всероссийской конференции «Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов» (Москва, 24-27 июля 2002г.), типография ИСМАН. Черноголовка. 2002. -С. 391-395.

5. 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.

6. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение. - Черноголовка, ИСМАН, 2000. - 224 с.

7. 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; Опубл. 20.12.1997, Бюл. № 35. - 2 с.

8. 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; Опубл. 16.01.1998, Бюл. № 1. - 5 с.

9. Hwang S., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Varma A. Combustion wave microstructures in gas-solid system: Experiments and theory // Combustion Sci. Technology, 1997. Vol. 123. P. 165-183.

10. Hwang S., Mukas'yan A.S., Varma A. Mechanisms of combustion wave propagation heterogeneous reaction systems // Combustion Flame. 1998. Vol. 115. P. 354 363.

