

## ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ВОЛНЫ СВС В СИСТЕМЕ Ni-Al

А. В. Долматов, М. В. Пинчук, А. В. Сергейчев

Работа выполнена финансовой поддержке РФФИ (№15-48-00100) «Приборы контроля динамики распределения термодинамической температуры в процессах СВС материалов и газотермического напыления покрытий»

### Введение

Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет программировать свойства создаваемого материала параметрами шихты и начальными условиями [1–3]. Уникальность метода СВС заключается в простоте его практической реализации, не требующей дорогостоящего энергоемкого плавильного оборудования [4]. Необходимая теплота для синтеза материала возникает в процессе сильно экзотермической реакции компонентов шихты [5, 6]. В режиме волнового горения достигаются высокие градиенты температуры и условия экстремальной закалки синтезируемого материала, что позволяет с минимальными затратами производить широкий спектр продуктов недоступных другим технологиям [7–12].

Методы исследования механизмов и режимов СВ-синтеза играют важную роль в поиске новых технологических приемов создания уникальных материалов [13–16]. Высокие температуры (1000–3500 К) и скоротечность синтеза требуют бесконтактных быстродействующих средств измерения [17–19]. Большинство реакций СВС протекают в конденсированной фазе, что позволяет наблюдать их системами регистрации теплового излучения [20–22]. Оптическая пирометрия на основе матриц фотоэлементов (фотоматриц) способна фиксировать температурную картину СВС с пространственным и временным разрешением до 1 мкм и 10 мкс соответственно [23, 24]. Это позволяет исследовать явления теплопереноса в реагирующих дисперсных средах и определять теплофизические параметры процесса СВС на микро- и макроуровнях [25–27].

**Цель** – исследовать взаимосвязь температуры горения, скорости фронта волны синтеза и характерного размера очага при вариации состава и начальной температуры шихты в системе Ni-Al.

### Пробоподготовка и экспериментальная установка

Эксперимент состоял из 2 частей. В первой части исследований определялись свойства волнового режима горения в системе Ni-Al при изменении состава шихты от стехиометрии NiAl до Ni<sub>3</sub>Al. Расчёт состава шихты выполнялся следующим образом. Масса образца составляла 20 грамм, а массовая доля Ni в шихте  $g(Ni)$  рассчитывалась по формуле:

$$g(Ni)_i = g(NiAl) + \frac{g(Ni_3Al) - g(NiAl)}{4} \cdot (i - 1), \quad (1)$$

где  $i = \overline{1,5}$ ,  $g(NiAl) = 68.4\%$  – массовая доля никеля для стехиометрии NiAl в процентах,

$g(Ni_3Al) = 86.7\%$  – массовая доля никеля для стехиометрии Ni<sub>3</sub>Al в процентах,

$i$  – номер эксперимента. Массовая доля Al  $g(Al)$  определялась как

$$g(Al)_i = 1 - g(Ni)_i. \quad (2)$$

Результаты расчёта состава шихты образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер эксперимента	Массовая доля Ni $g(Ni)$ , %	Масса Ni в образце $m(Ni)$ , грамм	Массовая доля Al $g(Al)$ , %	Масса Al в образце $m(Al)$ , грамм
1 (NiAl)	68.4	13.6	31.6	6.4
2	73.0	14.6	27	5.4
3	77.5	15.5	22.5	4.5
4	82.1	16.4	17.9	3.6
5 (Ni <sub>3</sub> Al)	86.7	17.3	13.3	2.7

Во второй части проводилось изучение влияния начальной температуры шихты на характеристики реакции синтеза материала  $Ni_3Al$ . Были подготовлены 5 образцов соответствующей стехиометрии. Внутри каждого образца вводилась хромель-алюмелевая термопара для контроля начальной температуры шихты  $T_{ш}$ , которая изменялась в пределах от 50 до 280 °С с шагом 60 °С. В процессе СВ-синтеза никелидов алюминия использовали карбонильный порошок никеля ПНК-УТЗ дисперсностью 15 мкм и порошок алюминия ПА4 дисперсностью 50 мкм. Компоненты засыпались в смеситель типа «пьяная бочка» и подготавливали в течение 20 минут. Затем смесь помещалась в кварцевую трубку диаметром 26 мм с кажущейся плотностью 2.6 г/см<sup>3</sup>.

В качестве экспериментальной установки использовался оригинальный комплекс оптической пирометрии, включающий микроскоп МБС-10, полосовой светофильтр SL-725-40 с центральной длиной волны 725 нм и полушириной полосы пропускания 40 нм, высокоскоростную монохромную камеру «ВидеоСпринт» с размером фотоматрицы 1280x1024 элемента [28]. Пространственное разрешение комплекса в эксперименте составляло 5.85 мкм, а частота съёмки – 300 кадров в секунду. Для измерения температуры комплекс был откалиброван на автоматизированном стенде, состав и методика функционирования которого описаны в работе [29]. Градуировочная кривая, показанная на рисунке 1, связывает цифровой код уровня сигнала «ВидеоСпринт» и температуру эталонной лампы ТРУ-1200-2350 на времени экспозиции 1300 мкс. Второй оптический канал микроскопа использовался для синхронизации начала видеосъёмки с моментом появления волны горения в области визирования камеры.

### Методика проведения эксперимента и обработки данных

Образец шихты в кварцевой трубке помещался в фокальную плоскость микроскопа (рис. 2). Инициация реакции производилась с помощью порошка титана и разогретой вольфрамовой проволоки. В результате проведения эксперимента регистрировалась динамика поля теплового излучения в процессе СВ-синтеза материала. Контроль начальной температуры образца осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары и индикатора Protek 506.

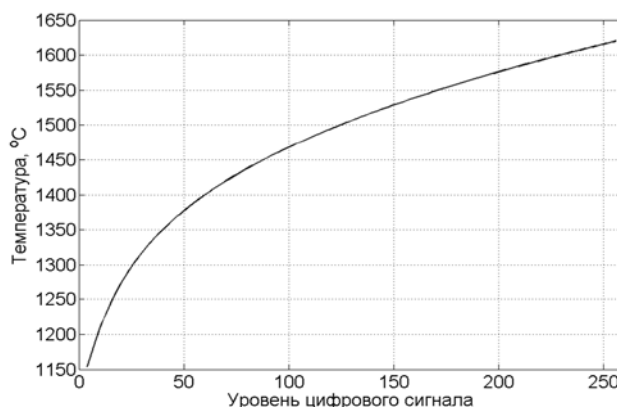


Рисунок 1 – Градуировочная кривая экспериментальной установки

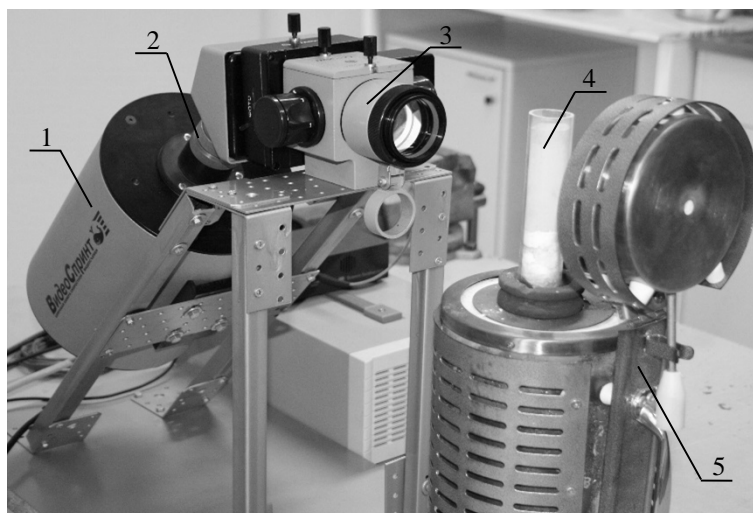


Рисунок 2 – Экспериментальная установка  
(1 – камера «ВидеоСпринт»; 2 – узкополосный светофильтр;  
3 – микроскоп МБС-10; 4 – образец шихты; 5 – вертикальная печь)

В опытах волна синтеза распространялась по направлению столбцов фотоматрицы (рис. 3). При анализе экспериментальных данных допускалось, что процесс СВ-синтеза материалов в волновом режиме является эргодичным, а статистические оценки макропараметров реакции можно считать постоянными как на всей поверхности шихты, так и во времени.

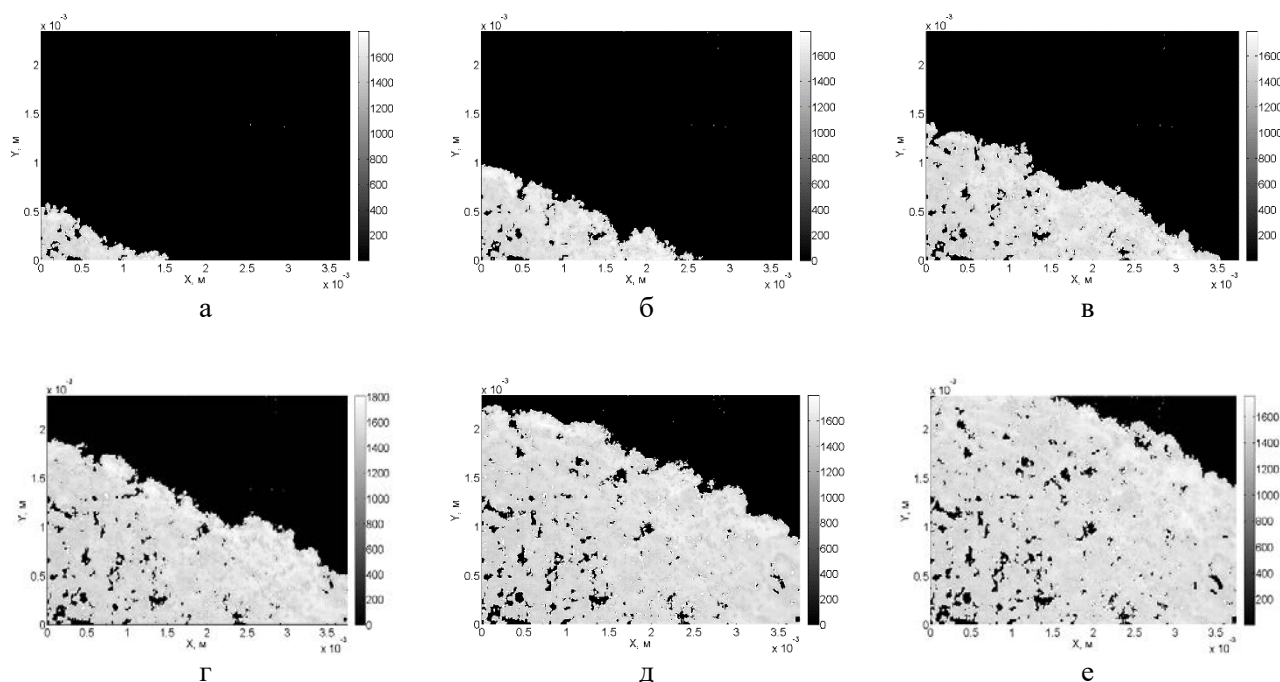


Рисунок 3 – Динамика температурного поля в процессе СВС ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ; в темных областях изображений температура ниже порога чувствительности системы измерения)

Монохромный поток излучения на пороге чувствительности экспериментальной установки соответствовал температуре  $1150^{\circ}\text{C}$ , а порог насыщения сигнала позволял контролировать максимальную температуру  $1650^{\circ}\text{C}$ . С помощью градуировочной кривой (рис. 1) производилось преобразование цифрового сигнала элементов изображения в значения температуры (рис. 3). Затем по каждому столбцу кадров видеоряда определялась зависимость координаты температурной границы от времени, типичный график которой приведён на рис. 4. Линейная регрессия этой зависимости позволяет вычислить тангенс угла наклона прямой, который равен скорости движения фронта реакции СВС на данном участке образца. Количество участков, на

которых производились измерения, равнялось числу столбцов фотоматрицы 1024. Среднее значение скорости фронта  $\bar{V}$ , вычисленное по всем участкам образца, использовалось как оценка математического ожидания  $M_V$  с малым доверительным интервалом и потенциально высокой чувствительностью к изменению свойств шихты и синтезируемого материала.

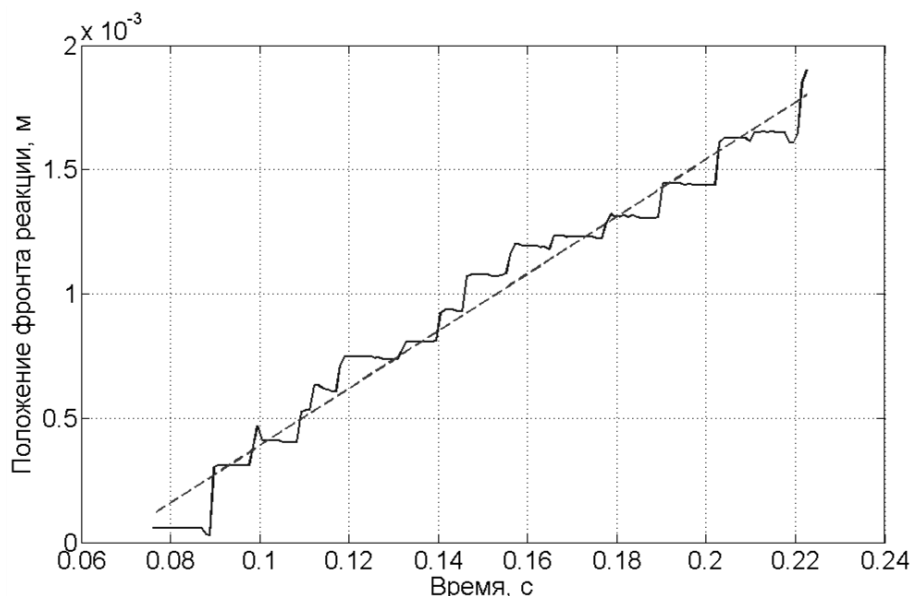


Рисунок 4 – Положение фронта реакции СВС на выбранном участке образца

Производная зависимости координаты фронта волны горения от времени имеет импульсный характер (рис. 5). Высота выбросов на этом графике соответствует толщине возникающих слоёв продукта.

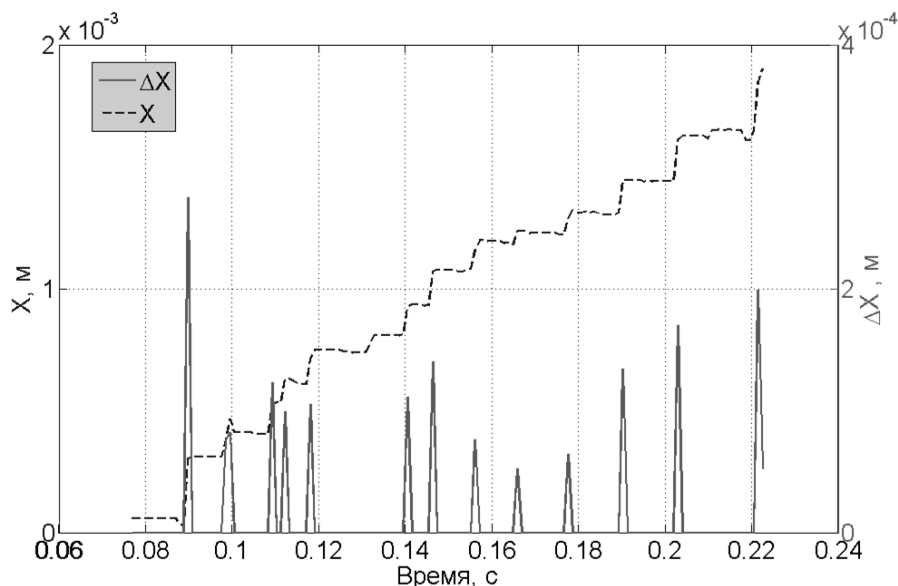


Рисунок 5 – Динамика размера слоёв продукта СВС на выбранном участке образца  
( $X$  – координата фронта волны реакции;  $\Delta X$  – приращение координаты фронта за время между соседними кадрами тепловизионной съемки)

Эргодичность изучаемого процесса СВС позволяет использовать выборку, полученную по измерениям в разные моменты времени на различных участках образца, для оценки математического ожидания размера слоя образующегося продукта  $M_h$ . Одним столбцом фотоэлементов фиксировалось образование 10-20 слоев продукта. При количестве столбцов фотоматрицы

1024 объем выборки был пропорционален  $10^4$ , что гарантировало малый доверительный интервал и погрешность оценки  $M_h$  по среднему значению  $\bar{h}$ .

Зависимость положения фронта реакции от времени позволила получить выборку максимальных температур в волне горения на разных участках образца (рис. 6). Дисперсия максимальной температуры связана с микронеоднородностью состава шихты, а также отличающимися условиями выделения и диффузии тепла на разных участках образца.

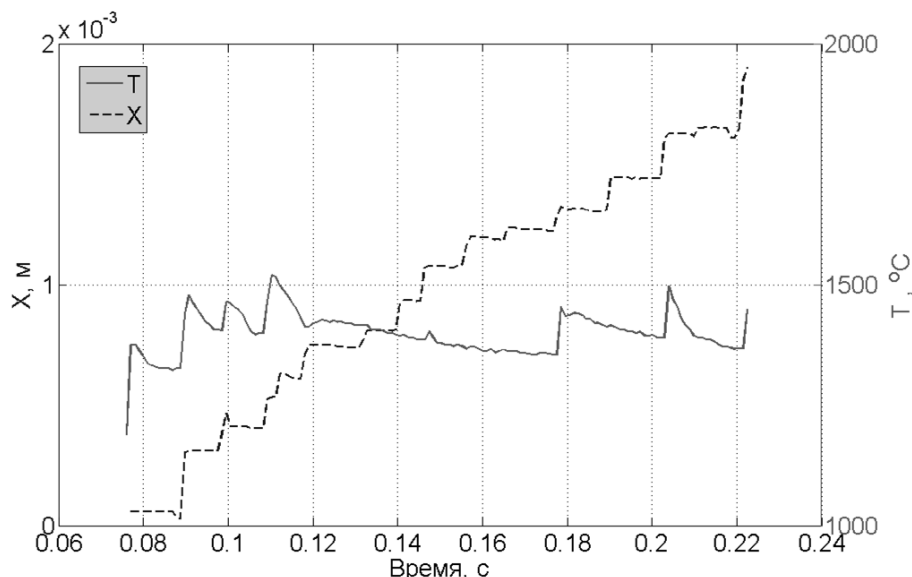


Рисунок 6 – Динамика температуры горения на выбранном участке образца  
( $X$  – координата фронта волны реакции)

Среднее значение максимальной температуры дает статистически устойчивый макропараметр  $\bar{T}_{гор}$ , который должен характеризовать формируемый материал, программируемый составом и качеством шихты, а также условиями осуществления синтеза.

### Результаты эксперимента

Описанная методика анализа динамики температурного поля процесса СВС реализована в среде Matlab. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

#### Результаты эксперимента с вариацией состава шихты

№	$g(Ni), \%$	$\bar{V}, \text{см/с}$	$\bar{h}, \text{мкм}$	$\bar{T}_{гор}, ^\circ\text{C}$
1	68.4	1.02	126.3	1609
2	73.0	0.47	93.3	1631
3	77.5	0.67	125.3	1577
4	82.1	3.82	200.0	1542
5	86.7	3.00	455.8	1406

Таблица 3

#### Результаты эксперимента с вариацией температуры шихты

№	$T_{ш}, ^\circ\text{C}$	$\bar{V}, \text{см/с}$	$\bar{h}, \text{мкм}$	$\bar{T}_{гор}, ^\circ\text{C}$
1	50	3.64	196.6	1412
2	110	2.95	147.4	1416
3	160	2.32	121.5	1435
4	220	0.95	52.2	1423
5	280	1.35	97.9	1404

В процессе горения экспериментальных образцов наблюдался эффект сцинтилляционной волны реакции, когда вдоль фронта хаотично возникали очаги с температурой превышающей среднюю по фронту [30]. Развитие и движение очагов происходило также вдоль фронта и соответствовало известному механизму эстафетного гетерогенного горения [31]. По результатам опытов с вариацией состава шихты видно, что с ростом массовой доли  $Ni$  средняя температура горения в волне синтеза сначала испытывает небольшой рост, а затем понижается (рис. 7).

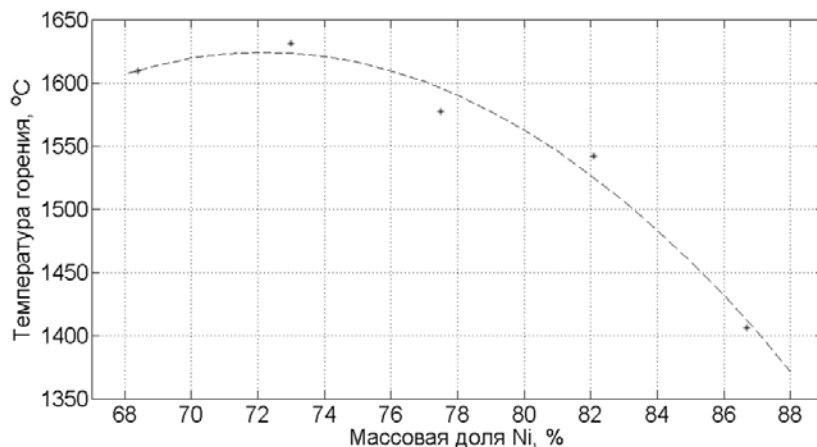


Рисунок 7 – Зависимость температуры горения от массовой доли Ni

В образце со стехиометрией  $NiAl$  ( $g(Ni) = 68.4\%$ )  $\bar{T}_{гор} = 1609^\circ C$ , а максимум  $\bar{T}_{гор} = 1631^\circ C$  достигается при массовой доле  $g(Ni) = 73\%$ . Это можно объяснить случайной упаковкой частиц шихты [32], которая приводит к микронеоднородности ее состава и не позволяет при стехиометрии  $NiAl$  всему  $Ni$  прореагировать с  $Al$ , а небольшой избыток  $Ni$  связывает весь  $Al$  шихты и вызывает максимальный экзотермический эффект. При этом поглощение теплоты возникающее из-за избытка  $Ni$  оказывается меньше, чем дополнительное тепловыделение. Дальнейшее монотонное снижение температуры (рис. 7) связано с уменьшением в продукте реакции доли  $NiAl$ , образование которого имеет наибольший тепловой эффект в системе  $Ni - Al$ .

Наиболее интересным является факт обратной зависимости скорости фронта волны СВС в системе  $Ni - Al$  от температуры горения. При изменении состава шихты от стехиометрии  $NiAl$  к  $Ni_3Al$  температура понижается на  $200\text{--}250^\circ C$ , а скорость возрастает более чем в 3.5 раза (рис. 7, 8).

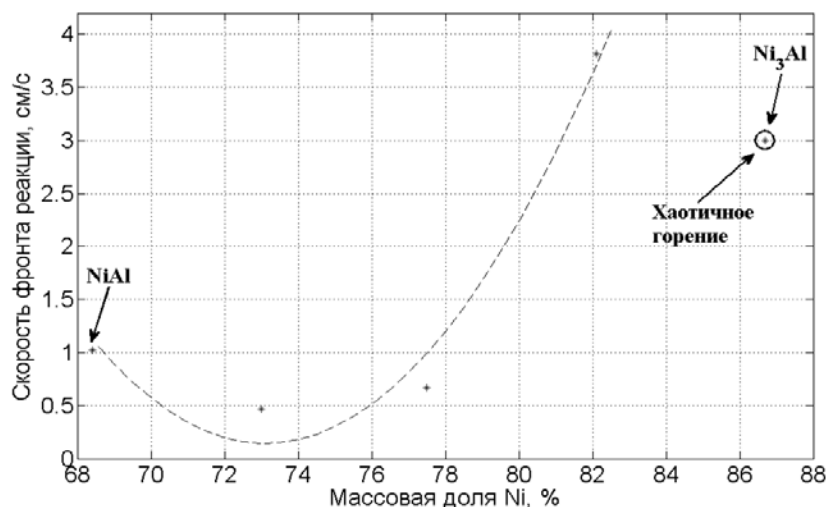


Рисунок 8 – Зависимость скорости фронта реакции от массовой доли Ni

Объяснить эту зависимость можно, если привлечь результаты измерения характерного размера слоя образующегося продукта (рис. 9). Фактически в принятой эргодичной модели процесса синтеза данный параметр соответствует размеру очага горения в нормальном направлении к фронту сцинтилляционной волны, а плотность распределения ширины слоя продукта можно трактовать как статистику размера очага горения (рис. 10).

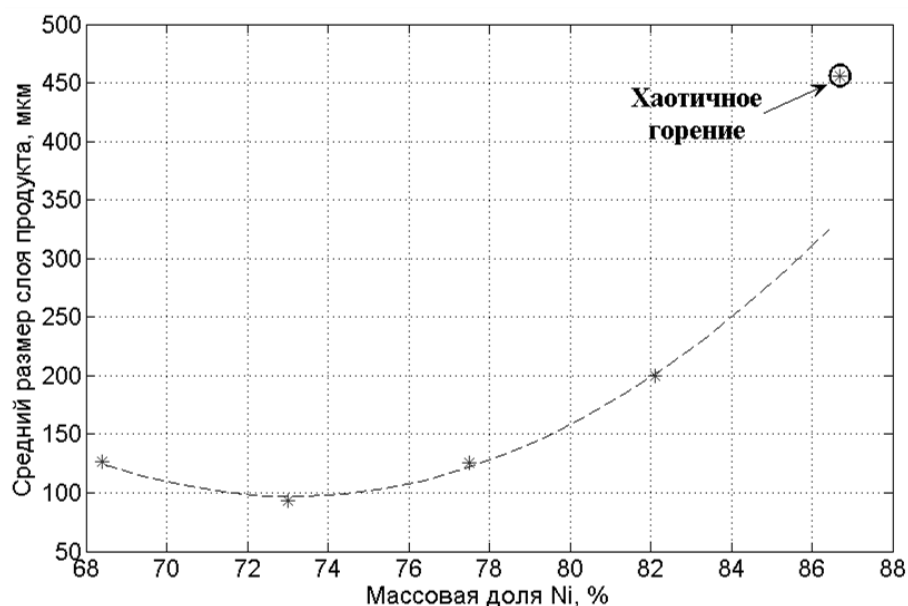


Рисунок 9 – Зависимость средней толщины слоя продукта от массовой доли Ni

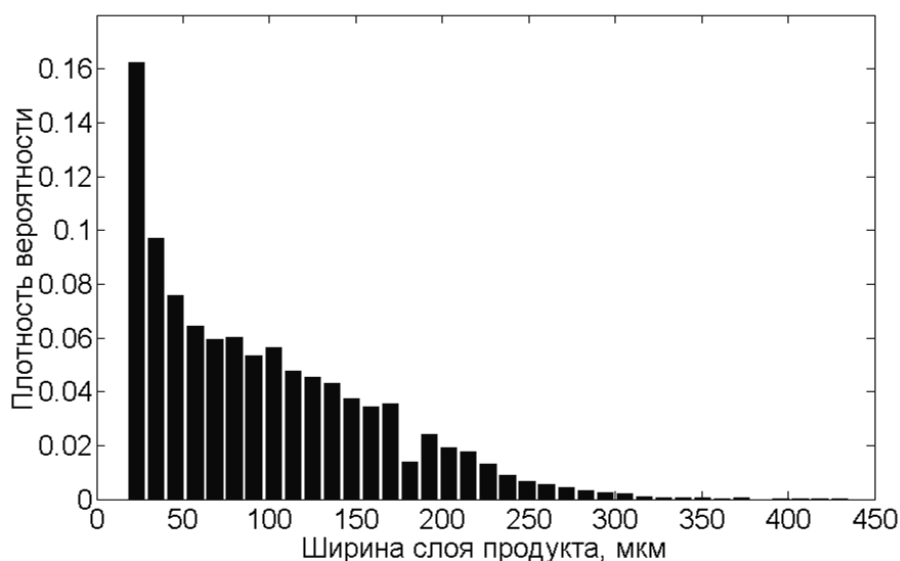


Рисунок 10 – Плотность распределения ширины слоя продукта для стехиометрии  $NiAl$  (объем выборки: 13205 измерений)

Если обозначить  $h$  размер очага горения в нормальном к фронту направлении, тогда вдоль фронта размер очага составит  $c \cdot h$ , где  $c$  – некая константа (геометрический фактор). При наблюдении за очагом горения он будет двигаться вдоль фронта волны со скоростью пропорциональной  $c \cdot h$ , а скорость движения фронта с учетом эстафетного механизма и неизменной температуропроводности шихты должна быть пропорциональна  $c \cdot h^2$ . Подобная зависимость подтверждается результатами эксперимента (табл. 2 или рис. 11).

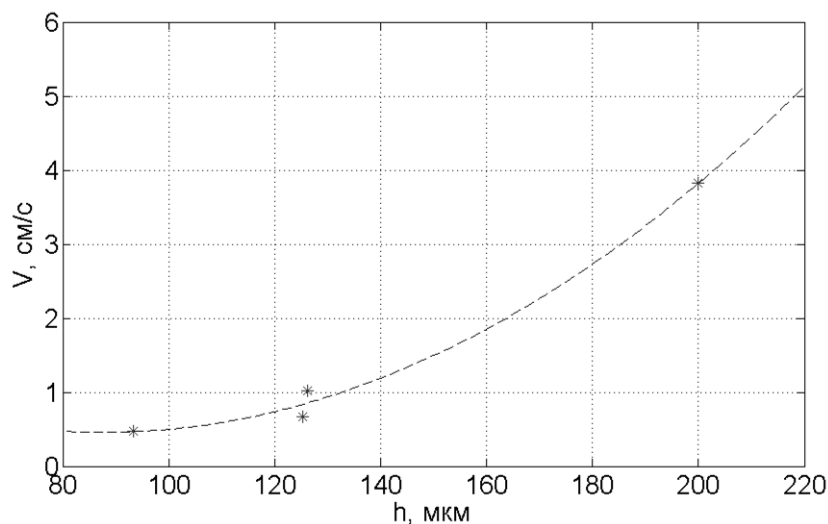


Рисунок 11 – Зависимость скорости движения фронта волны от размера очага

Вид распределения ширины слоя продуктов (размера очага горения  $h$ ) наилучшим образом совпадает с показательным законом, а наиболее вероятным является появление в волне СВС малых очагов горения (рис. 10). Однако их скорость движения по шихте меньше, чем у очагов большего размера. Это должно приводить к поглощению мелких очагов крупными. Очаги с размером большим математического ожидания имеют малую вероятность появления, так как для этого потребуется перегрев шихты в области прилегающей к фронту волны СВС. Чем крупнее очаг, тем сильнее должен быть перегрев. Хотя в микронеоднородной по составу шихте с дискретной структурой такая ситуация вероятна. Результаты эксперимента показывают, что среднее значение размера очага  $\bar{h}$  снижается с ростом температуры горения в волне синтеза (рис. 12).

В некоторых работах размер очага горения рассматривается как масштаб шероховатости (гетерогенности) фронта реакции [33, 34]. Если предположить, что в месте искривления фронта возникают наиболее благоприятные условия зажигания будущих очагов, тогда именно шероховатость фронта характеризует и стабилизирует СВ-синтез в волновом режиме. Из эксперимента видно, что ее масштаб при изменении состава шихты от стехиометрии  $NiAl$  к  $Ni_3Al$  линейно зависит от температуры  $\bar{T}_{гор}$  до определенного предела, за которым слишком большой размер очагов горения и малые искривления фронта приводят к разрушению волны реакции и переходу синтеза в режим хаотичного горения (рис. 12).

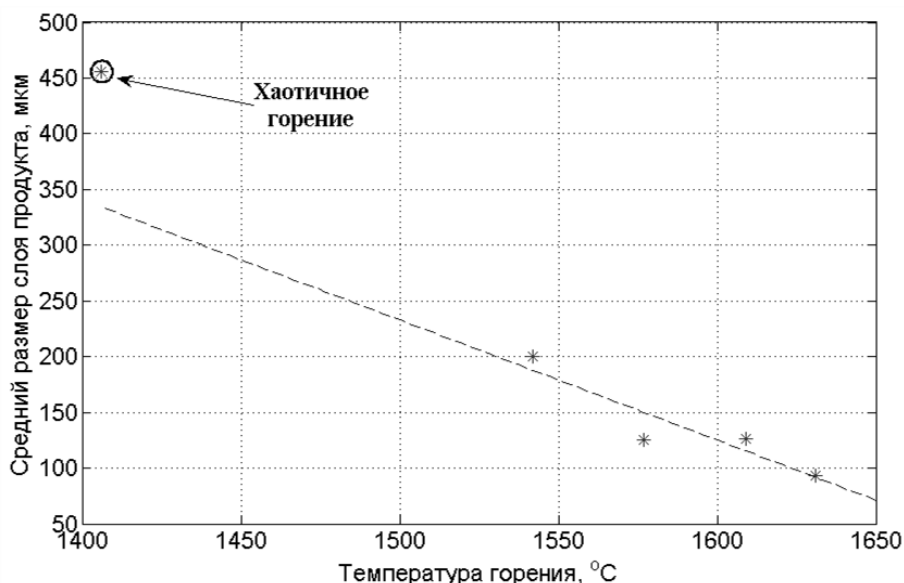


Рисунок 12 – Зависимость среднего размера очага от температуры горения



Анализируя результаты первой части экспериментальных исследований можно сделать вывод, что в волновом режиме СВ-синтеза материалов поддерживается такая взаимосвязь между скоростью фронта волны, размером очага горения и температурой реакции, которая обеспечивает максимальную скорость уменьшения энергии Гиббса системы  $Ni-Al$ .

Сделанные предположения и вывод подтверждаются результатами второй части экспериментальных исследований. Рост начальной температуры шихты от 50 до 280 °C с погрешностью 2% не вызывает изменения средней температуры горения  $\bar{T}_{гор}$  смеси стехиометрии  $Ni_3Al$  (рис. 13), но ведет к снижению среднего размера очага  $\bar{h}$  (рис. 14). Причем размер очага уменьшается линейно вплоть до минимальной величины, которая определяется суммой размеров частиц  $Ni$  и  $Al$ , и соответствует так называемой элементарной ячейке горения [3, 35].

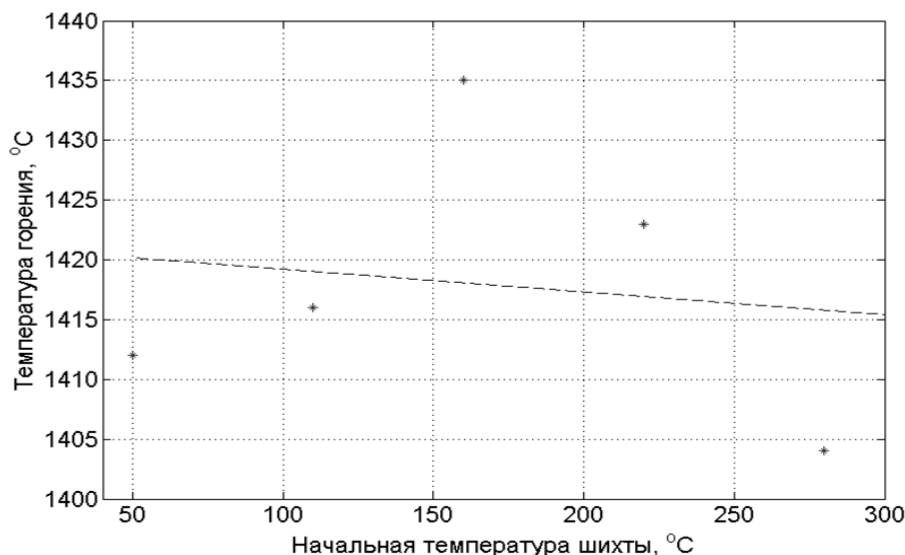


Рисунок 13 – Зависимость температуры горения системы со стехиометрией  $Ni_3Al$  от начальной температуры шихты

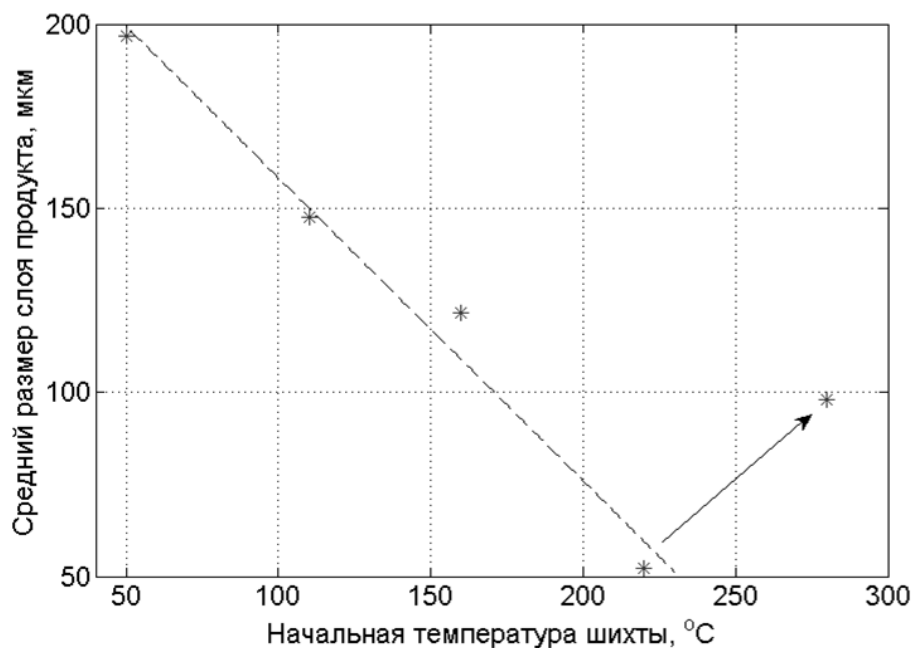


Рисунок 14 – Зависимость средней толщины слоя  $Ni_3Al$  от начальной температуры шихты

Такое поведение можно объяснить сокращением времени индукции зажигания будущего очага при постоянной температуропроводности шихты. Однако с дальнейшим повышением

начальной температуры шихты по результатам опытов прогнозируется рост размера очага горения (рис. 14). Возможно, он связан с увеличением доли неравновесного излучения ячейки горения, провоцирующего преждевременное зажигание соседа. Ответ на данный вопрос можно получить, если контролировать спектр ячейки горения в этих условиях [24]. Скорость фронта волны СВС ведет себя согласно предположениям, сделанным при анализе результатов первой части экспериментального исследования, и пропорциональна квадрату размера очага горения  $h$  (рис. 15).

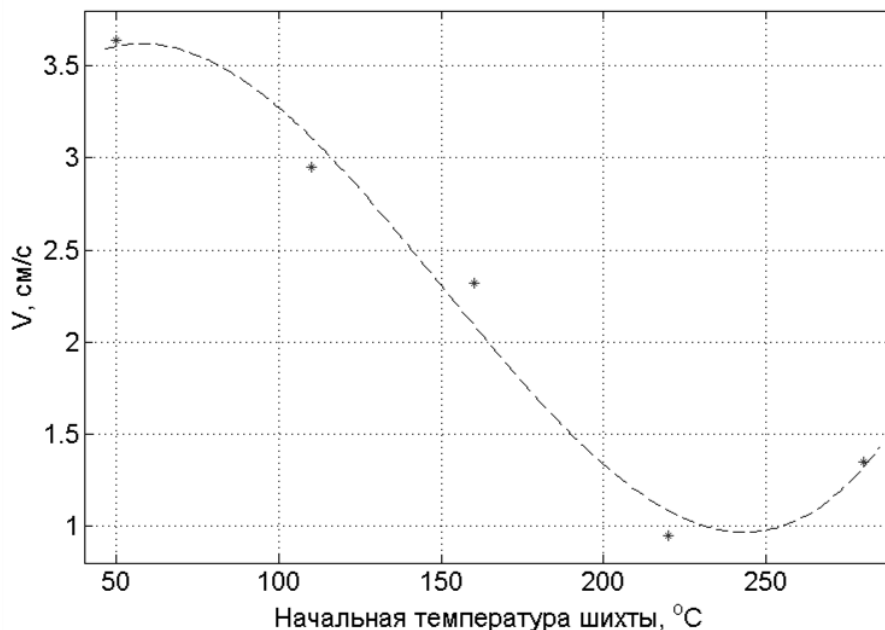


Рисунок 15 – Зависимости скорости фронта волны синтеза  $Ni_3Al$  от начальной температуры шихты

### Заключение

Регистрация динамики тепловой картины высокотемпературного синтеза материалов оригинальным комплексом оптической пирометрии способствовала исследованию тепловой структуры волны реакции на микроуровне, а статистический подход позволил объединить многочисленные измерения, выполненные в разные моменты времени и на различных участках объекта, в оценки макропараметров процесса, которые обладали достаточной чувствительностью, чтобы выявить их взаимосвязь с составом и начальной температурой шихты.

Экспериментальные исследования СВ-синтеза в системе  $Ni-Al$  при плотности шихты  $2.6 \text{ г/см}^3$  показали, что скорость фронта реакции пропорциональна квадрату размера очага горения, а рост температуры горения или начальной температуры шихты ведет к линейному уменьшению размера очага горения в определенных пределах.

Смена режима СВС с волнового на хаотичный происходит со скачком размера очага. Это позволяет сделать вывод, что шероховатость фронта волны синтеза провоцирует преждевременное, по сравнению с плоским фронтом, возникновение очагов горения и тем самым фактически формирует режим синтеза в виде распространяющейся волны, а взаимосвязь скорости фронта, размера очага, температуры горения и параметров шихты способствует в процессе синтеза воспроизводству шероховатости определенного масштаба.

Размер очагов горения может снижаться до минимальной величины равной размеру элементарной ячейки горения. После чего должно происходить увеличение энергонапряженности в очаге, которое может вести к возникновению эффектов нелинейной или неравновесной теплопередачи и, как следствие, к росту размера очагов горения, наблюдаемого в эксперименте. Для изучения механизма этих эффектов оптическими методами вероятно потребуются применение средств спектроскопии.

## Литература

1. Мержанов, А. Г. Явления волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций [Текст] / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. М. Шкиро // Вестник АН СССР. – 1984. – № 10.
2. Merzhanov, A. G.; Borovinskaya, I. P. A new class of combustion processes // Combustion Sci. Technology, 1975. – Vol. 10. – № 5–6. – P. 195–200.
3. Твердопламенное горение [Текст] / А. Г. Мержанов, А. С. Мукасян. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с.
4. Development Prospects of SHS Technologies in Altai State Technical University / V. V. Evstigneev, P. J. Guljaev, I. V. Miljukova et al. // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2006. – Т. 15. – № 1. – С. 99–104.
5. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика [Текст] / Под ред. А. Е. Сычева. – Черноголовка : Территория, 2001. – 432 с.
6. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] / В. В. Евстигнеев, Б. М. Вольпе, И. В. Милюкова, Г. В. Сайгутин. – М. : Высшая школа, 1996. – 274 с.
7. Итин, В. И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений [Текст] / В. И. Итин, Ю. С. Найборошенко. – Томск : Изд-во Томского университета, 1989. – 214 с.
8. Гуляев, П. Ю. Байесовский подход в интегральных методах оптического контроля параметров реакции СВС и топливных струй [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // В сб. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез Материалы и технологии / под ред. В. В. Евстигнеева, В. М. Белова. – Новосибирск, 2001. – 284 с. – С. 136–139.
9. Гуляев, И. П. Плазменная обработка дисперсных материалов : монография : в 2-х ч. [Текст] / И. П. Гуляев // Часть I. Физические основы. – Ханты-Мансийск : УИП ЮГУ, 2013. – 115 с.
10. Гуляев, П. Ю. Материалы для фильтрационного дожигания попутных нефтяных газов на основе высокопористой СВС-металлокерамики [Текст] / И. В. Милюкова, А. В. Долматов // Тезисы докладов IV международной школы-семинара: «Высокотемпературный синтез новых перспективных наноматериалов» / под ред. В. В. Евстигнеева, А. В. Еськова, Д. А. Харина. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – С. 29–31.
11. Гуляев, П. Ю. Интеллектуальные наноструктурные СВС-системы и виртуальные механизмы формирования ультрастабильных цеолитных материалов [Текст] / П. Ю. Гуляев, И. В. Милюкова, А. В. Долматов // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 38–39.
12. Разработка СВС-каталитических материалов на основе наноструктурированных интерметаллидов и цеолитов для решения экологических проблем транспорта [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, И. В. Милюкова [и др.] // Вестник Югорского государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 23–28.
13. Барзыкин, В. В. Исследование закономерностей зажигания гетерогенных систем с тугоплавкими продуктами реакции [Текст] / В. В. Барзыкин, В. П. Стовбун // Процессы горения в химической технологии и металлургии. – Черноголовка : Изд-во ОИХФ АН СССР, 1975. – С. 274–283.
14. Шкиро, В. М. Исследование закономерностей горения смесей титана с углеродом [Текст] / В. М. Шкиро, И. П. Боровинская. – Черноголовка : Изд-во ОИХФ АН СССР, 1975. – С. 253–258.
15. О механизме распространения волны горения в смесях титана с бором [Текст] / Т. С. Азатян, В. М. Мальцев, А. Г. Мержанов, В. А. Селезнев // Физика горения и взрыва. – 1980. – № 2. – С. 37–42.
16. Долматов, А. В. Сверхадиабатические режимы СВ-синтеза пористой металлокерамики для фильтрационного дожигания попутных нефтяных газов [Текст] / А. В. Долматов, П. Ю. Гуляев, И. В. Милюкова // Доклады X международной конференции: «Физико-химические процессы в неорганических материалах (ФХП-10)». – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2007. – Т. 2. – С. 46–48.

17. In-situ selfpropagating–hightemperature–synthesis controlled by plasma / P. Yu. Gulyaev, I. P. Gulyaev, Cui Hong-zhi, I. V. Milyukova // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 28–33.
18. Ковалев, Д. Ю. Динамика фазовых переходов при СВС порошковой системы 3Cu–Al в режиме теплового взрыва [Текст] / Д. Ю. Ковалев, В. И. Пономарев, В. Д. Зозуля // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 6. – С. 66–70.
19. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику [Текст] / А. С. Рогачев, А. С. Мукасян. – М. : Физматлит, 2013. – 400 с.
20. Андреев, В. А. Исследование горения смесей гафния и бора методом оптической пирометрии [Текст] / В. А. Андреев, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев // Физика горения и взрыва. – 1980. – № 4. – С. 18–23.
21. Гарколь, Д. А. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования процессов СВС [Текст] / Д. А. Гарколь, П. Ю. Гуляев, В. В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 72–77.
22. Вольпе, Б. М. Исследования взаимодействия в СВС-системе Ni-Al-Cr на основе высокотемпературной яркостной пирометрии [Текст] / Б. М. Вольпе [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 10, № 3. – С. 445–446.
23. Долматов, А. В. Виртуальная тепловизионная система с микросекундным периодом регистрации [Текст] / А. В. Долматов, А. О. Маковеев, К. А. Ермаков, В. В. Лавриков // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 31–36.
24. Долматов, А. В. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза [Текст] / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, Р. Р. Имамов // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 32–42.
25. Бенин, А. А. Структура тепловой волны в некоторых процессах СВС [Текст] / А. А. Бенин, А. Г. Мержанов, Г. А. Нерсисян // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 250, № 4. – С. 880–884.
26. Мержанов, А. Г. Микроструктура фронта горения в гетерогенных безгазовых системах (на примере горения системы 5Ti + 3Si) [Текст] / А. Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 6. – С. 68–81.
27. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру [Текст] / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9–3. – С. 69–76.
28. Бересток Г. М. Система оптического контроля тепловых параметров процесса СВ-синтеза [Текст] / Г. М. Бересток, П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, И. В. Милюкова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2 (46). – С. 71–81.
29. Долматов, А. В. Комплекс автоматизированной калибровки тепловизионной системы на базе MATLAB [Текст] / А. В. Долматов, К. А. Ермаков, В. В. Лавриков, А. О. Маковеев // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 59–63.
30. Varma A., Rogachev A. S., Mukasyan A. S., Hwang S. Complex behavior of self-propagating reaction waves in heterogeneous media // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1998. – No. 95. – P. 11053–11058.
31. Рогачев, А. С. К теории эстафетного распространения волны горения в гетерогенной среде [Текст] / А. С. Рогачев, А. Г. Мержанов // Доклады РАН. – 1999. – Т. 365, № 6. – С. 788–791.
32. Гуляев, П. Ю. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов [Текст] / П. Ю. Гуляев [и др.] // Ползуновский альманах. – 2007. – № 3. – С. 39–41.
33. Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Varma A. Microstructural mechanisms of combustion in heterogeneous reaction media // Proc. of the Combustion Institute. – 2000. – Vol. 28. – P. 1413–1419.
34. Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Mercedes M., Varma A. Microstructural correlations between reaction medium and combustion wave propagation in heterogeneous systems // Chem. Eng. Sci., 2004. – Vol. 59. – P. 5099–5105.
35. Varma A., Mukasyan A. S., Hwang S. Dynamics of self-propagating reactions in heterogeneous media: Experiments and model // Chem. Eng. Sci., 2001. – Vol. 56. – P. 1459–1466.

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

37. Gulyaev I. P., Ermakov K. A., Gulyaev P. Yu. New High-Speed Combination of Spectroscopic And Brightness Pyrometry For Studying Particles Temperature Distribution In Plasma Jets // European researcher. – 2014. – № 3–2 (71). – C. 564–570.