

УДК 537.52:542.9:661.66

**Д. И. ЧЕЛПАНОВ, Н. И. КУСКОВА, А. А. СМАЛЬКО****РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНАЯ ИНИЦИАЦИЯ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В НЕКОТОРЫХ ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМАХ**

Рассчитаны параметры разрядноимпульсной инициации процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системах порошков составами алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20. Проведены экспериментальные исследования некоторых закономерностей и основных параметров разрядноимпульсной инициации самораспространяющегося синтеза в выбранных порошковых системах. Приведены дифрактограммы синтезированных порошков.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разрядноимпульсная инициация, алюминий, политетрафторэтилен, углеродные наноматериалы

**Введение.** Значительный интерес научного сообщества к исследованию способов получения, структуры и свойств наноразмерных систем обусловлен многообразием вариантов их практического применения. Малый размер структурных составляющих – до 100 нм – определяет значительные различия в свойствах наноматериалов от их макро-аналогов [1-3]. Несмотря на научную и практическую ценность углеродных наноматериалов (УНМ), их массовое производство сдерживается несовершенством основных методов синтеза (малый выход УНМ, необходимость химической очистки и сложность технологического процесса) для эффективного использования в промышленности. Проблема увеличения производительности синтеза, выхода и уменьшения энергозатрат остается актуальной.

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Широкое применение для получения ценных в практическом отношении композитов металлов [4], карбидов [5], боридов [6], нитридов, оксидов и гидридов [7] нашел самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). СВС-метод основан на химических реакциях, протекающих внутри узкой высокотемпературной зоны (от 1000 К до 3000 К), которая распространяется в исходной системе порошков, состоящей из мелкодисперсной фракции окислителя и восстановителя [8]. Не так давно было обнаружено, что СВС-реакции могут также приводить к формированию УНМ и их производных: наночастиц [9], углерод-инкапсулированных магнитных наночастиц [10], многослойного графита [11], нановолокон и нанотрубок [11-13], мелкодисперсной углеродной сажи [14].

Условия получения порошка наноуглерода в режиме СВС (инертная атмосфера, высокие температуры, исходное сырье и т.д.) отличаются от промышленных условий производства порошкообразного аморфного углерода, в связи с чем появляется возможность получения иной модификации этого элемента [15].

Предварительная обработка шихты, состав системы начальных порошковых реагентов и условия инициации высокоэкзотермичной реакции синтеза играют основную роль в реализации процесса СВС, поэтому исследованию их влияния на закономерности горения СВС-систем предоставляется первоочередное

значение, в частности, решению вопроса выбора соответствующих реагентов и условий реакции.

Важным фактором при выборе источника зажигания может служить то, что температура зажигания является функцией энергии активации и нескольких кинетических переменных [16]. На температуру шихты перед зажиганием влияют следующие процессы: начальный нагрев, при котором весь объем шихты нагревают до определенной температуры до начала СВС; прединициационный нагрев, вызванный передачей тепла от источника нагрева образца до начала реакции; предволновой нагрев, возникающий в результате передачи тепла от фронта волны нагрева к образцу во время реакции [17]. Прединициационный нагрев отличается от начального тем, что является нестационарным процессом передачи тепла через шихту в виде теплового градиента в локальной области перед ее зажиганием. Так как изменение температуры зажигания существенно влияет на параметры процесса СВС (включая результирующую температуру реакции, от которой зависит качественный и количественный состав получаемого продукта), и то, что начальный и предволновой нагревы определяются, в большей мере, соответственно, начальными параметрами пред-СВС обработки (нагрев системы порошков в печи) и состава шихты (удельная электропроводность отдельных компонентов), нами предлагается использование разрядноимпульсной инициации процесса СВС как метода влияния на стадию прединициационного нагрева с целью уменьшения его влияния при сохранении стабильности поджига смеси.

**Целью работы** является использование разрядноимпульсной инициации процесса СВС в выбранных исходных системах порошков.

**Системы порошков для СВС наноуглерода.** Предложенные в работе [15] системы для синтеза наноуглерода имеют характеристики, необходимые для проведения СВС-процесса, поэтому могут быть использованы для экспериментальной реализации процесса.

Для реализации СВС нами была выбрана система порошковых реагентов алюминий – политетрафторэтилен ( $Al - (-C_2F_4)_n$ ), имеющая следующие преимущества:

1. высокая расчетная адиабатическая температура

и энтальпия;

2. удобный в применении порошок политетрафторэтилена (не взрывоопасен, не ядовит, есть вероятность получения нанокластеров углерода при взаимодействии фтора и алюминия с освобождением атомов углерода);

3. низкая температура плавления порошка алюминия ( $660^{\circ}\text{C}$ ) позволяет осуществлять более стабильную инициацию СВС при меньшей требуемой температуре, чем для других систем.

Также нами был исследован процесс СВС в системе алюминий – композит Ф4К20 (политетрафторэтилен + кокс (20 %)), применение которого предложено для увеличения массовой доли углерода в изначальной шихте, и, соответственно, увеличения выхода наноуглерода. Дополнительно с целью замедления реакции СВС были проведены исследования по добавлению в состав изначальной шихты 5 % KCl.

Для выбранных систем СВС образцы для экспериментов готовились из смеси порошков с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическим уравнениям химических реакций (в нашем случае,  $4\text{Al} + 3\text{C}_2\text{F}_4 = 4\text{AlF}_3 + 6\text{C}$ ).

### Разрядноимпульсная инициация СВС

Для исследования процесса разрядноимпульсной инициации СВС нами был разработан соответствующий электроразрядный контур (рис. 1).

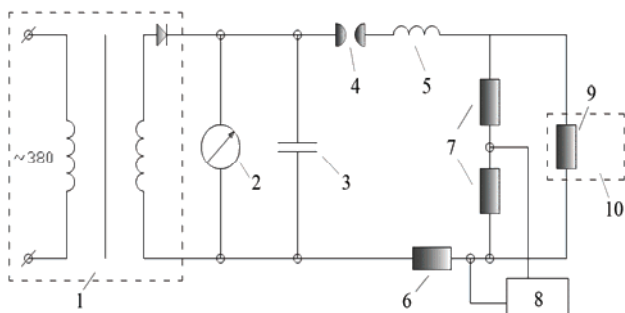


Рисунок 1 – Электроразрядный контур инициации процесса СВС: 1 – высоковольтный трансформатор, запитанный от сети напряжением  $\sim 380\text{ В}$ ; 2 – индикационный киловольтметр; 3 – батарея конденсаторов; 4 – управляемый воздушный разрядник; 5 – катушка индуктивности; 6 и 7 – измерительный шунт и делитель напряжения, подключенные к осциллографу; 9 – металлическая проволока, расположенная в технологическом узле 10

В работах [15] и [18], являющихся теоретическим базисом наших исследований, не приведен расчет температуры инициации (поджига) порошковых систем. Температуры поджига измерена де факто в процессе синтеза с применением термопар и видеорегистраторов. В большинстве остальных работ вопрос температуры инициации был или опущен вовсе, или частично раскрыт только для не интересующих нас на данном этапе порошковых систем. Основываясь на необходимости получения приблизительной температуры инициации для искомых порошковых смесей, нами были рассчитаны параметры иницирующей

проволоки при заданных параметрах электроразрядного контура (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные параметры температуры нагрева проволоки

Материал проволоки	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$T$ , мс	$U_p$ , кВ	$r$ , мм	$\Delta T_m$ , К
нихром	1080	33,8	1,2	1,1	1,2	630
нихром	1080	33,8	1,2	1,5	1,2	1172
вольфрам	1080	33,8	1,2	0,5	0,3	1065
вольфрам	1080	33,8	1,2	0,5	0,2	1941

В табл. 1  $L$  – общая индуктивность разрядного контура с учетом дополнительной катушки индуктивности, добавленной для увеличения длительности разряда;  $T$  – расчетный период разряда;  $U_p$  – разрядное напряжение на момент срабатывания разрядника;  $r$  – радиус металлической иницирующей проволоки в виде спирали;  $\Delta T_m$  – максимальная расчетная температура, которую может достичь иницирующая проволока в момент разряда, без учета теплопотерь.

Дальнейший выбор параметров разрядноимпульсной инициации ( $U_p, r$ ) основывался на том, что при некоторых критических значениях напряжения, радиуса и длины проволоки может происходить ее испарение, что может приводить к нежелательным последствиям (отсутствие зажигания порошковой системы, смещение или частичное разрушение капсулы с шихтой под воздействием волн давления от взрыва проводника). Для экспериментов были выбраны нихромовая проволока радиусом 1,2 мм и вольфрамовая проволока радиусом 0,3 мм.

Также перед началом непосредственных исследований были разработаны и протестированы различные варианты конструкции капсулы, содержащей исходную порошковую шихту нужной степени компактирования. Для уменьшения количества примесей в получаемом продукте, простоты и доступности использования, было предложено использование капсулы из кварцевого стекла различного диаметра и толщины.

Далее были проверены основные способы подвода энергии к шихте от иницирующей спирали: торцовый, продольный и внешний (рис. 2).

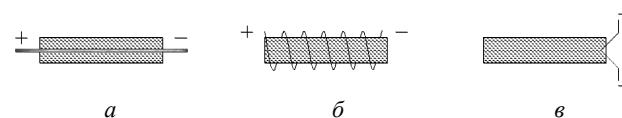


Рисунок 2 – Способы подвода энергии к исходному образцу при СВС

Недостатком продольного способа (рис. 2, а) подвода тепла, который заключается в расположении иницирующей спирали по оси образца, является сложность в видеорегистрации волны горения в случае волнового СВС и высокая вероятность возникновения явления взрывного горения, при котором процесс СВС происходит практически одновременно во всем объеме образца. Внешний способ (рис. 2, б) также не подходит по специфике нашего исследования, а именно ввиду использования кварцевой трубки в ка-

честве капсулы и появления неизбежных теплопотерь на стенках капсулы и увеличения времени задержки начала СВС. При торцовом способе (рис. 2, в) происходит передача тепла непосредственно на ограниченный участок шихты и стабильная инициация процесса СВС при правильно подобранных начальных параметрах, потому был выбран торцовый метод.

Отличительной особенностью процесса СВС в системе порошков  $Al-(C_2F_4)_n$ , описанной в [15], является то, что фронт горения, проходя по образцу, не оставляет за собой спеченного вещества, так как целевой продукт разлетается по всему объему технологического узла. Также наблюдается очень сильное повышение скорости распространения фронта реакции, что делает небезопасным проведение процесса синтеза в относительно больших объемах. Потому нами предлагается применение водной среды для наполнения технологического узла с целью уменьшения разлета конечного синтезированного продукта и упрощения его сбора.

Немаловажным фактором при СВС нанопорошков является предсинтезная обработка порошковых реагентов и подготовка исходной шихты. Производимое измельчение компонентов шихты и просеивание мелкой фракции позволяет получать систему с порошками необходимого размера, тогда как предварительной просушкой реагентов достигается дополнительное очищение от примесей. Как указывалось выше, изменение плотности шихты также может влиять как на общую эффективность СВС (температуры зажигания, скорость реакции), так и на конструкцию самого образца системы порошков – при достаточной пресовке достигается сохранение цилиндрической формы образца и без применения внешней капсулы. Отсутствие капсулы приводит к изменению условий СВС.

Проанализировав полученные теоретические и экспериментальные данные, нами был разработан и сконструирован следующий вариант технологического узла лабораторной установки разрядноимпульсного иницирования СВС (рис. 3).

Разработанный технологический узел имеет в основе следующий принцип работы: подготовленную из порошковых реагентов шихту (спрессованную до определенной плотности или помещенную в капсулу) располагают в специальной ячейке, после чего к торцу образца подводят до точечного контакта иницирующую спираль (вольфрамовую или ни хромовую проволоку, предварительно закрепленную в токоведущих электродах). Далее камера с образцом герметично закрывается и заполняется дистиллированной водой через подводящую трубку. После успешной инициации и окончания СВС процесса, камеру раскрывают, капсулу извлекают из ячейки и, в случае продолжения эксперимента, устанавливают новый образец.

После окончания эксперимента, воду с содержащимся в ней получаемым продуктом сливают и фильтруют на вакуум-фильтровальной установке, после чего нанопорошок собирают и просушивают. Далее проводят экстракцию фуллеренов из получаемого

продукта в неполярном растворителе (бензол, толуол) по методике, предложенной в [15].



Рисунок 3 – Технологический узел лабораторной установки разрядноимпульсной инициации СВС

#### Отработка методики разрядноимпульсного иницирования процесса СВС УНМ

Экспериментальные исследования выбранных СВС-систем подтвердили результаты теоретических расчетов: реализация синтеза возможна в обеих системах СВС при параметрах, близких к расчетным ( $U_p \approx 450$  В, вольфрамовая иницирующая спираль  $r = 0,3$  мм и  $l = 200$  мм как наиболее оптимальных с точки зрения стабильности зажигания шихты и сохранения структуры проволоки).

На рис. 4 показана покадровая съемка иницированного при помощи разряда на вольфрамовую проволоку радиусом 0,3 мм СВС процесса в кварцевой капсуле внутренним диаметром 3 мм и длиной 70 мм, заполненной шихтой составом алюминий + политетрафторэтилен. В углу каждого кадра указано время в секундах от начала инициации процесса горения. После разряда на вольфрамовую спираль длительностью  $\sim 1,1$  мс и задержки менее 33 мс, во время которой происходит прогревание иницируемой зоны, шихта ярко загорается и переходит в режим СВС горения.

На кадрах в моменты времени 0,73 с и 1 с особенно заметен разлет получаемого продукта через верхний торец капсулы, который при дальнейшем перемещении волны горения вглубь образца становится все менее выраженным, вплоть до полного исчезновения. Перемещение волны горения, как видно на последующих кадрах (начиная с 1,27 с) и на рис. 5, позволяет рассчитывать некоторые важные параметры СВС: длительность процесса, линейную скорость горения и длину волны горения.

Далее были рассчитаны следующие основные параметры, характеризующие процесс СВС – ширина зоны прогрева  $x_m$ , время реакции в волне  $t_p$ , время нагревания вещества в волне  $t_m$  и скорость нагревания

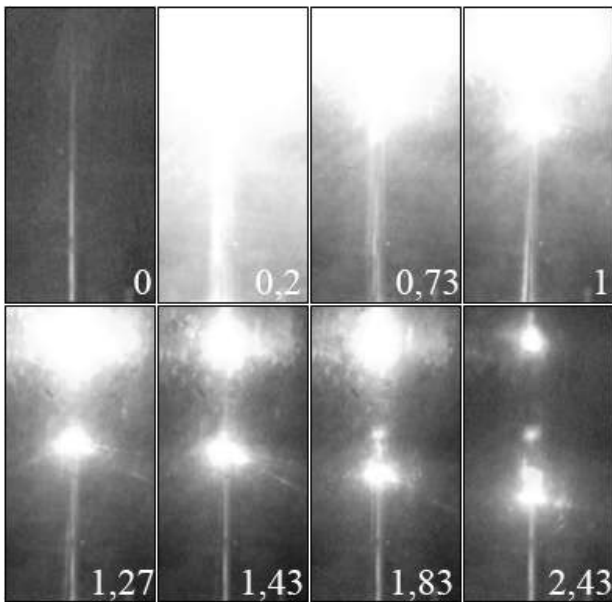


Рисунок 4 – СВС процесс шихты состава алюминий + политетрафторэтилен

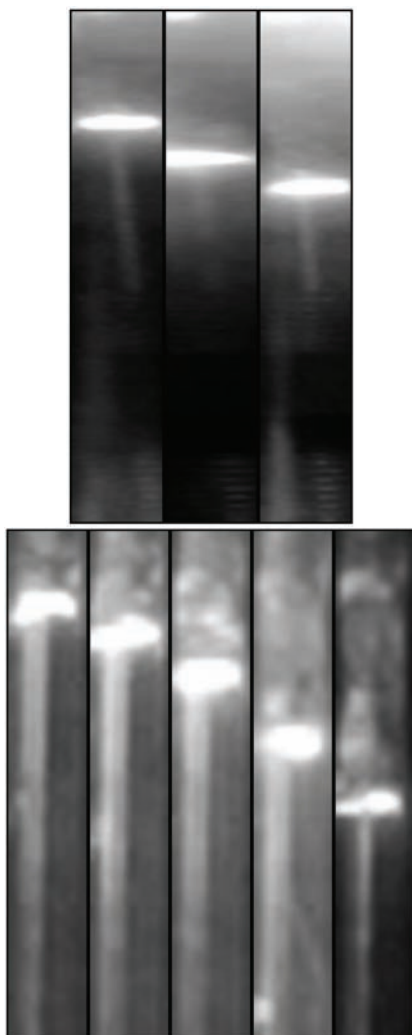


Рисунок 5 – Перемещение волны горения в различных образцах СВС-систем

вещества в волне  $W$ , используя расчетные формулы, указанные в [18]:

$$x_m = a/u; \tag{1}$$

$$t_m = x_m/u; \tag{2}$$

$$t_p = (L_e - x_m)/u; \tag{3}$$

$$W = (T_2 - T_0)/t_m, \tag{4}$$

где  $a$  – температуропроводность образца,  $u$  – линейная скорость горения,  $L_e$  –длина волны горения,  $T_0$  – начальная температура шихты,  $T_2$  – температура горения в максимальной точке профиля температур.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных и результаты расчетов по формулам (1) – (4) приведены в табл. 2.

Результаты рентгенофазового анализа образцов исходной шихты и получаемого продукта систем алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20 приведены на рис. 6 (а и б, соответственно).

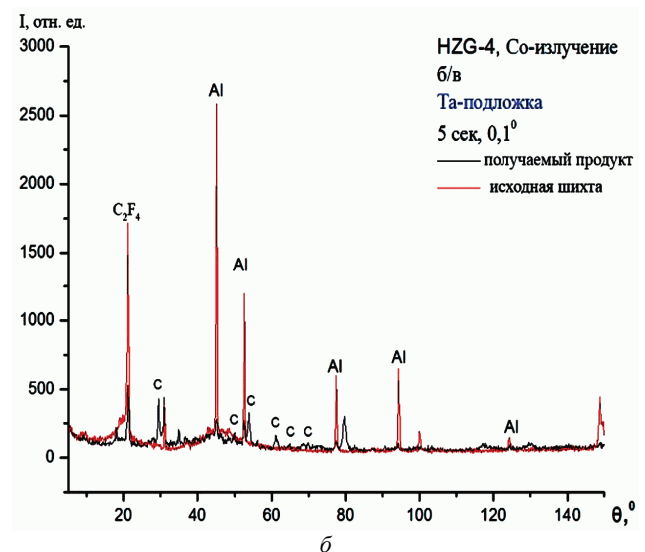
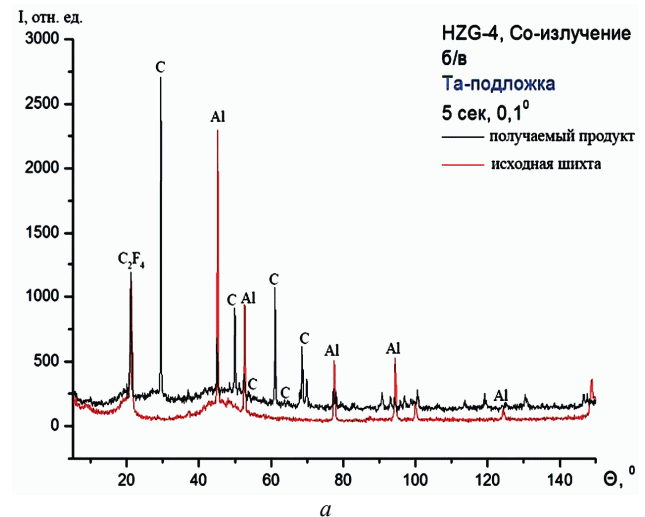


Рисунок 6 – Дифрактограммы образцов исходной шихты и получаемого продукта СВС систем алюминий + политетрафторэтилен (а) и алюминий + композит Ф4К20 (б)



Таблица 2 – Параметры процесса СВС в выбранных порошковых системах

Система	Al – (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>h</sub>	Al – (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>h</sub> + KCl (5%)	Al – (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>h</sub>	Al – (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>h</sub> + KCl (5%)	Al – (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>h</sub>	Al + Ф4К20
Материал спирали	ни-хром	ни-хром	ни-хром	ни-хром	вольфрам	вольфрам
Диаметр образца $d_{пор}$ , мм	6	6	3	3	3	3
Длина образца $l_{пор}$ , мм	50	60	80	80	70	70
Температура зажигания $T_3$ , К	1020	1060	1030	1070	1040	1030
Температура горения $T_2$ , К	2650	2630	2740	2730	2740	2730
Длительность процесса $t_{np}$ , с	1,6	2,23	2,8	2,9	3,41	3,05
Линейная скорость горения $u$ , мм/с	36,46	25,44	29,8	26,6	28,63	29,56
Ширина зоны прогрева $x_m$ , мм	0,61	0,88	0,75	0,84	0,78	0,71
Общая длина волны $L_в$ , мм	3,7	2,2	2,5	3,3	2,7	3,1
Время реакции в волне $t_p$ , с	0,08	0,05	0,06	0,09	0,07	0,08
Время нагревания вещества в волне $t_m \cdot 10^2$ , с	1,68	3,46	2,52	3,16	2,73	2,42
Скорость нагревания вещества в волне $W \cdot 10^{-4}$ , К/с	13,98	6,75	9,7	7,7	8,95	10,07

**Выводы.** Использование разрядноимпульсного контура позволяет производить заживание процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системах порошков составом алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20.

По результатам теоретических расчетов параметров инициации СВС, была разработана и сконструирована лабораторная установка, которая позволила исследовать некоторые закономерности заживания СВС процессов в выбранных порошковых системах импульсным разрядом при параметрах контура  $U_p = 1,5$  кВ,  $C = 1080$  мкФ,  $L = 33,8$  мкГн на нихромовую проволоку радиусом 1,25 мм и при параметрах контура  $U_p = 0,5$  кВ,  $C = 1080$  мкФ,  $L = 33,8$  мкГн на вольфрамовую проволоку радиусом 0,3 мм. Результаты теоретических расчетов параметров заживания СВС были подтверждены экспериментально.

Экспериментально определены основные параметры процесса СВС выбранных порошковых систем: температура зажигания  $T_3 \approx 1050$ К; линейная скорость горения  $U \approx 30$  мм/с; ширина зоны прогрева  $x_m \approx 0,75$  мм; общая длина волны горения  $L_в \approx 2,8$  мм; время реакции в волне  $t_p \approx 0,07$  с и скорость нагревания вещества в волне  $W \approx 10,7 \cdot 10^4$  К/с.

Качественных различий в процессе синтеза для выбранных порошковых систем обнаружено не было, количественные параметры синтеза отличаются не существенно (менее 15 % для основных параметров скоростей и времен). Добавление в состав шихты KCl привело к уменьшению скоростей горения (от 20 до 50 % для капсулы внутренним диаметром 6 мм и от 10 до 20 % – для капсулы внутренним диаметром 3 мм).

Результаты рентгенофазового анализа показали, что большая часть исходных порошков вступила в СВС-реакцию с образованием УНМ.

**Список литературы:** 1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation / K. E. Drexler // NewYork: JohnWiley&Sons, Inc. – 1992. 2. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / Под ред. П. П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2008. 3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering / W. F. Smith, J. Hashemi // 5th Edition McGraw-Hill. – 2010. 4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis / W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman, J. J. Moore // Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. 5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis / Garret W. – Colorado School of Mines, 2012. 6. Абдулкаримова Д. С. Получение боридных композитов методом СВС / Д. С. Абдулкаримова, И. М. Вонгай, З. А. Мансуров, О. Одава-ра // Межд. симпозиум «Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия». – Алматы, 2010. – С. 116-118. 7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications / A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan et al. // Advanced Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 24. – P. 78-226. 8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors / M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko // New Carbon Materials. – Apr., 2010. – Vol. 25, № 2. – P. 81-88. 9. de Basi R. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles using combustion waves / R. de Basi, A. Figueiredo, A. Fernandes et al. // Solid State Communications. – 2007. – Vol. 144. – P. 15-17. 10. Bystrzejewski M. Carbon-encapsulated magnetic nanoparticles spontaneously formed by thermolysis route / M. Bystrzejewski, A. Huczko, H. Lange et al. // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2008. – Vol. 16. – P. 217-230. 11. Szala M. Combustion synthesis of hollow carbon fibers / M. Szala // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2008. – Vol. 17. – P. 106-111. 12. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures / A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange et al. // Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – P. 16244-16251. 13. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers / A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19. – P. 395022. 14. Нажиткызы М. Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана / М. Нажиткызы, З. А. Мансуров, И. К. Пури, Т. А. Шабанова, И. А. Цыганова. – Нефть и газ, 2010. – № 5 (59). – С. 27-33. 15. Амосов А. П. О возможности получения наноуглерода при химико-конденсационном горении порошковых смесей / А. П. Амосов, Ю. М. Марков, С. М. Ахметсагиров, Г. В. Бичуров // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 107-113. 16. Wang T. Activation Energy of Self-Heating Process Studied by DSC / T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu and J. S. Zhang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2002. – Vol. 70. – P. 507-519. 17. Nuechterlein J. Production of Ceramic Nanoparticles Through Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) and Their Introduction Into a Metallic Matrix to Form Metal Matrix Composites (MMC) / J. Nuechterlein // Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering. – 2013. – P. 76. 18. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. Под научной редакцией В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007.

- Bibliography (transliterated):** 1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. K. E. Drexler. New York: John Wiley & Sons, Inc. – 1992. Print. 2. Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Mirovye dostizhenija. Pod red. P. P. Mal'ceva. Moscow: Tehnosfera, 2008. Print. 3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering. W. F. Smith, J. Hashemi. 5th Edition McGraw-Hill. 2010. Print. 4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis. W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman, J. J. Moore. Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. Print. 5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis. Garret W. Colorado School of Mines, 2012. Print. 6. Abdulkarimova D. S. Poluchenie boridnyh kompozitov metodom SVS. D. S. Abdulkarimova, I. M. Vongaj, Z. A. Mansurov, O. Odavara. Mezhd. simpozium «Fizika i himija uglerodnyh materialov. Nanoizhenerija». Almaty, 2010. 116-118. Print. 7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan, et al. Advanced Chemical Engineering. 1998. Vol. 24. 78-226. Print. 8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors. M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko. New Carbon Materials. Apr., 2010. Vol. 25, № 2. 81-88. Print. 9. de Basi R. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles using combustion waves. R. de Basi, A. Figueiredo, A. Fernandes et al. Solid State Communications. 2007. Vol. 144. 15-17. Print. 10. Bystrzejewski M. Carbon-encapsulated magnetic nanoparticles spontaneously formed by thermolysis route. M. Bystrzejewski, A. Huczko, H. Lange et al. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2008. Vol. 16. 217-230. Print. 11. Szala M. Combustion synthesis of hollow carbon fibers. M. Szala. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2008. Vol. 17. 106-111. Print. 12. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures. A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange et al. Journal of Physical Chemistry B. 2005. Vol. 109. 16244-16251. Print. 13. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers. A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska et al. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007. Vol. 19. 395022. Print. 14. Nazhipkyzy M. Poluchenie supergidrofobnoj uglerodnoj poverhnosti pri gorenii propana. M. Nazhipkyzy, Z. A. Mansurov, I. K. Puri, T. A. Shabanova, I. A. Cyganova. Neft' igaz, 2010. № 5 (59). 27-33. Print. 15. Amosov A. P. O vozmozhnosti poluchenija nanougleroda pri himiko-kondensacionnom gorenii poroshkovykh smesej. A. P. Amosov, Ju. M. Markov, S. M. Ahmetsagirov, G. V. Bichurov. Vestnik Samar'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Ser.: Tehničeskie nauki. 2007. № 1. 107-113. Print. 16. Wang T. Activation Energy of Self-Heating Process Studied by DSC. T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu and J. S. Zhang. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2002. Vol. 70. 507-519. Print. 17. Nuechterlein J. Production of Ceramic Nanoparticles Through Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) and Their Introduction Into a Metallic Matrix to Form Metal Matrix Composites (MMC). Jacob Nuechterlein, Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Colorado School of Mines. 2013. 76. Print. 18. Amosov A. P. Poroshkovaja tehnologija samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza materialov: Ucheb. posobie. A. P. Amosov, I. P. Borovinskaja, A. G. Merzhanov. Pod nauchnojredakciej V. N. Anciferova. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. Print.

Поступила (received) 19.08.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Челпанов Дмитрий Ильич**, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, аспирант; тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

**Chelpanov Dmitry Illych**, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, postgraduate student; tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

**Кускова Наталья Ивановна**, доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

**Kuskova Natalya Ivanovna**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electro-physical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

**Смалько Анатолий Александрович**, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, инженер; тел.: (096) 583-04-69.

**Smalko Anatolij Aleksandrovich**, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, engineer; tel.: (096) 583-04-69.