

На правах рукописи

**Иванов Дмитрий Анатольевич**

**ГОРЕНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ  
РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

**01.04.17 – «химическая физика,  
горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Автор

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте химической физики им. Н.Н. Семенова

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор физико-математических наук,  
профессор Фролов Юрий Васильевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ: доктор технических наук,  
профессор Павловец Георгий Яковлевич  
(Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Москва)

доктор физико-математических наук,  
профессор Губин Сергей Александрович  
(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва)

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФНПЦ НИИ Прикладной Химии (г. Сергиев  
Посад)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 002.092.01 при Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН по адресу:

142432, г. Черноголовка, Московской области, ул. Ак. Осипьяна, 8, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.



Гордополова И.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Знание закономерностей влияния физико-химических свойств компонентов на уровень комплекса характеристик пиротехнических смесей (ПС) и продуктов их горения имеет важное теоретическое и практическое значение при разработке пиротехнических устройств на их основе. В частности, взаимодействие гетерогенных высокотемпературных струй продуктов горения ПС с различными конструкционными материалами (КМ) может использоваться в технологиях резки, перфорации и обработки их поверхностей. Характер воздействия главным образом определяется свойствами продуктов горения ПС, истекающих из пиротехнических устройств, известных как пиротехнические резакки (ПР).

В зависимости от целей и условий применения изменяются требования, предъявляемые к характеристикам работы ПР: при перфорации КМ желательно, чтобы время прожигания и время работы ПР было минимальным; при обработке КМ необходимо, чтобы воздействию подвергались только поверхностные слои, а время работы ПР определяется площадью обрабатываемой поверхности; при резке время работы и время прожигания определяются длиной шва и толщиной разрезаемого материала.

Обеспечить необходимый уровень характеристик работы ПР можно, изменяя время горения ПС и прожигающую способность сформированной струи продуктов горения. Прожигающая способность зависит как от кинетической энергии, так и от свойств струи продуктов горения. Кинетическая энергия двухфазного потока определяется скоростью горения ПС, от которой также зависит и время работы ПР. Основные параметры струи продуктов горения, влияющие на прожигающую способность, – температура, объем и плотность газовой фазы, соотношение газовой и конденсированной фазы. Значение этих характеристик должно значительно меняться в зависимости от целей применения.

Накопленные экспериментальные данные позволяют выделить методы, с помощью которых можно воздействовать не только на группы характеристик горения ПС, но и на отдельные свойства. Однако в случае многокомпонентных ПС изучение влияния отдельных компонентов на характеристики струи продук-

тов горения значительно усложняется по сравнению с бинарными пиротехническими композициями или монотопливами, содержащими функциональные добавки. Несмотря на значимость рассматриваемого вопроса, до настоящего времени практически не изучены закономерности влияния концентрации и свойств компонентов на комплекс характеристик многокомпонентных ПС и их продуктов горения.

В связи с этим научно-техническое обоснование и разработка способов эффективного регулирования основных характеристик струи продуктов горения ПС путем изменения физико-химических свойств компонентов является актуальной задачей. Выявленные закономерности позволят выделить пути эффективного регулирования основных характеристик струи продуктов горения ПС, тем самым повышая эффективность работы ПР на их основе в зависимости от целей и условий эксплуатации.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы явилось получение закономерностей влияния физико-химических свойств компонентов на формирование и регулирование комплекса основных характеристик продуктов горения пиротехнических смесей, предназначенных для использования в качестве рабочего вещества в пиротехнических резаках при перфорации, резке и обработке поверхностей конструкционных материалов.

Исходя из указанной цели исследования решены следующие задачи:

1. Анализ состояния проблемы изменения прожигающей способности ПР за счет изменения характеристик гетерогенного потока.
2. Выбор компонентной базы ПС прожигающего действия (ПСПД) и определение алгоритма исследования характеристик ПСПД и продуктов его горения.
3. Установление закономерностей влияния физико-химических свойств, концентрации, дисперсности, формы и способов введения основных компонентов на характеристики ПС и продуктов его горения.
4. Изучение характеристик термохимических реакций в волне горения.
5. Определение влияния физико-химических свойств компонентов ПС и параметров ПР на характеристики его работы и характер воздействия на КМ.
6. Разработка рекомендаций по компоновке пиротехнических смесей с требуемыми характеристиками горения с учетом условий их функционирования и предназначения.

Объектами исследования явились пиротехнические составы прожигающего действия.

Предметами исследования явились зависимости характеристик пиротехнических составов прожигающего действия и продуктов его горения от физико-химических свойств компонентов.

**Научная новизна работы:**

1. Решена задача прогнозируемого изменения характеристик горения многокомпонентных высокометаллизированных ПС путем оптимизации компонентной базы. Впервые установлены масштабы влияния физико-химических свойств компонентов на характеристики горения ПСПД.
2. Обосновано влияние свойств компонентов (в том числе дисперсности и формы) на скорость горения с учетом выявленных особенностей протекания ведущих термохимических реакций в волне горения ПС на основе тугоплавких окислителей.
3. Установлены закономерности влияния физико-химических характеристик ПС (концентрация и дисперсность компонентов) и параметров ПР (масса и форма заряда, критический диаметр сопла) на характеристики разрушения КМ (толщина обрабатываемой пластины, время прожигания, время горения ПР).

**Практическая ценность работы.** Расчетные и экспериментальные данные по определению влияния физико-химических свойств компонентов на основные характеристики ПС могут быть использованы для разработки новых и повышения эффективности существующих пиротехнических составов, предназначенных для применения в качестве рабочего тела в устройствах активного воздействия на конструкционные материалы.

Полученные результаты являются основой для дальнейшего изучения влияния характеристик композиционной базы ПС на параметры разрушения КМ при взаимодействии высокотемпературной двухфазной струи продуктов горения с преградой.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе в качестве составной части лекционного курса по горению энергетических конденсированных систем.

Результаты диссертационной работы включены в составление отчетов по контрактам: Subcontract report S-16041.1 under DAAB15-03-C-0021 between Ar-

plied Research Associates. Inc. and Semenov Institute of Chemical Physics (SICP) Russian Academy of Science, Moscow, 2003, 148 p.; Subcontract report S-5552.4 under DAAB15-02-C-0034 between Applied Research Associates. Inc. and Semenov Institute of Chemical Physics (SICP) Russian Academy of Science, Moscow, 2004, 132 p.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе на Международной научной конференции «Проблемы баллистики – 2006» (Санкт-Петербург, 2006), научной сессии МИФИ-2008 (Москва, 2008), Международной конференции NEMs-2008 «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (Белокураха, 2008), научной сессии МИФИ-2009 (Москва, 2009).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Созданный алгоритм определения основных характеристик ПС, предназначенных для использования в ПР.
2. Разработанная модель термохимических превращений компонентов ПС в волне горения.
3. Выявленные закономерности влияния физико-химических свойств и концентрации компонентов на основные характеристики горения ПС.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка используемой литературы, приложения. Работа изложена на 142 страницах, содержит 53 рисунка, 29 таблиц, список цитируемой литературы из 118 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулирована цель диссертационной работы, указаны новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния и пути решения вопросов повышения прожигающей способности ПС. Рассмотрены результаты теоретических и

экспериментальных исследований, касающихся проблемы взаимодействия гетерогенной струи, истекающей из сопла ПР, с преградой. Определены основные характеристики струи продуктов горения, влияющие на эффективность тепломеханического воздействия на поверхностные и внутренние слои КМ. Проанализированы современные достижения в области исследования влияния физико-химических свойств композиционной базы ПС на формирование комплекса характеристик продуктов горения. Определены функциональные группы компонентов ПС, необходимые для оптимизации комплекса характеристик продуктов горения.

Во второй главе представлены иллюстрации и описание установок, используемых для проведения экспериментальных работ, методики проведения экспериментов.

В третьей главе обоснован выбор компонентной базы ПСПД и предложен алгоритм оценки его характеристик, влияющих на характер воздействия струи продуктов горения на КМ и определяющих безопасные методы изготовления, хранения и эксплуатации изделий на его основе. Алгоритм состоит из:

- предварительного выбора компонентной базы ПС;
- оценки термодинамических характеристик продуктов горения, влияющих на эффективность воздействия на КМ;
- экспериментального определения закона горения ПС;
- экспериментального определения чувствительности к механическим воздействиям;
- определении характера воздействия струи продуктов горения на преграду КМ (полевые испытания).

Проведен термодинамический расчет основных характеристик для выбранных компонентов ПС. Проанализированы зависимости этих характеристик продуктов горения от соотношения функциональных групп компонентов ПСПД: малогазового состава  $Fe_2O_3 + 2Al$  (МГС) и газогенерирующего состава  $3KClO_4 + 8Al$  (ГГС). В качестве связующего компонента взят фторсодержащий полимер – тефлон.

Найдены оптимальные концентрации компонентов для формирования базового состава ПСПД: 51%  $Fe_2O_3$  + 19%  $KClO_4$  + 27%  $Al$  + 3% тефлон (ПС *AF*). Адиабатическая температура горения ПС *AF* при давлении окружающей среды

$P = 1$  МПа равна  $T_{ад} = 3520$  К, объем газовой фазы продуктов горения ПС *AF* равен  $V_{гф} = 182$  дм<sup>3</sup>/кг при плотности  $\rho = 2,01$  г/дм<sup>3</sup>, соотношение газовой/конденсированной фазы продуктов горения составляет  $\sim 1/2$  (по массе).

Экспериментально определена чувствительность к механическим воздействиям: ПС *AF* относится к 18 классу чувствительности к удару и 4 классу чувствительности к трению.

Скорость горения  $U(P)$  ПС *AF* при различных начальных давлениях, в линейных и логарифмических координатах приведена на рис. 1 и рис. 2.

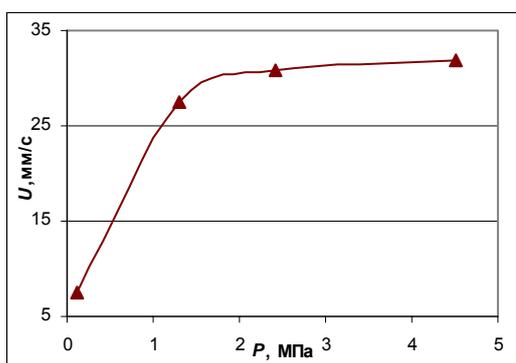


Рис. 1. Зависимость  $U(P)$  для ПС *AF*

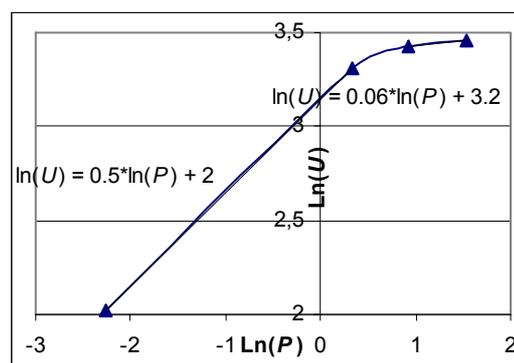


Рис. 2. Зависимость  $U(P)$  для ПС *AF*

При давлении  $P \sim 1,5$  МПа показатель степени в законе горения для данного состава уменьшается с  $\nu = 0,5$  до  $\nu = 0,06$ . Следовательно, давление в камере сгорания ПР не будет существенно изменяться при изменении диаметра сопла ПР на основе этого ПС. Это означает, что возможная частичная зашлаковка сопла ПР конденсированными продуктами горения не приведет к взрывному разрушению устройства.

Экспериментально подтверждена возможность использования ПС *AF* в качестве рабочего вещества в пиротехнических устройствах, предназначенных для разрушения и перфорации конструкционных материалов.

Таким образом, разработана схема исследования характеристик ПС и продуктов его горения, которая позволяет прогнозировать возможность использования ПС различного типа в качестве рабочего вещества ПР.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния концентрации и физико-химических свойств компонентов на основные характеристики горения ПС, влияющие на характер воздействия продуктов горения на КМ.

С помощью термодинамического расчета характеристик продуктов горения ПС определены зависимости продуктов горения от физико-химических свойств и концентрации компонентов: соотношение газовой и конденсированной фазы; температуры; плотности газофазных продуктов горения.

Для увеличения плотности газофазных продуктов горения в базовом составе  $AF$  Al частично заменялся на «инертные» добавки, не участвующие в окислительно-восстановительных реакциях и обладающие температурой кипения ниже, чем у основного состава (табл. 1). Найдено, что плотность газофазных продуктов горения  $\rho_{гф}$  экспоненциально зависит от молекулярной массы инертной добавки (рис.3).

Таблица 1. Состав исследуемых ПС

		Содержание компонентов в ПС, % мас.												
ПС В-во	AF	AFZ	AFNi	AFS	AFP	AFCu	AFW	AFL	AFK	AFB	AFCa	AFNa	AFMg	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
KClO <sub>4</sub>	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
Al	27	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
(C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Zn		10												
Ni			10											
Sn(β)				10										
Pb					10									
Cu						10								
WO <sub>3</sub>							10							
LiF								10						
KCl									10					
BaF <sub>2</sub>										10				
CaF <sub>2</sub>											10			
NaCl												10		
MgF <sub>2</sub>													10	

Показано, что путем добавления «инертного» вещества можно изменять плотность продуктов горения ПС в диапазоне значений от  $\rho_{гф} \sim 2,2$  г/л до  $\rho_{гф} \sim 3,2$  г/л. При этом адиабатическая температура горения ПС понижается пропорционально сумме стандартных энтальпий плавления и кипения «инертной» добавки (рис. 4) в интервале значений от  $T_{ад} \sim 3500$  К до  $T_{ад} \sim 2600$  К.

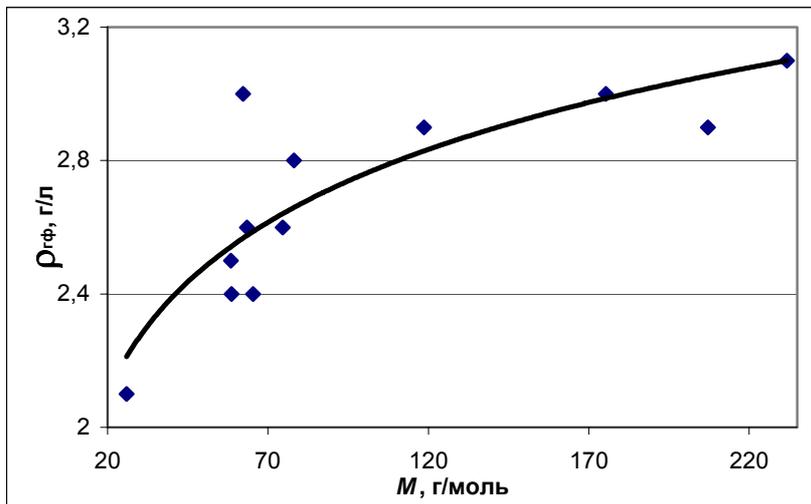


Рис. 3. Зависимость плотности газовой фазы продуктов горения  $\rho_{\text{гф}}$  от молярной массы добавленного вещества  $M$

Для компенсации энергетических потерь, связанных с плавлением и кипением «инертной» добавки, и для повышения адиабатической температуры горения в составе ПС тугоплавкий окислитель  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  заменялся на  $\text{MoO}_3$  (табл. 2).

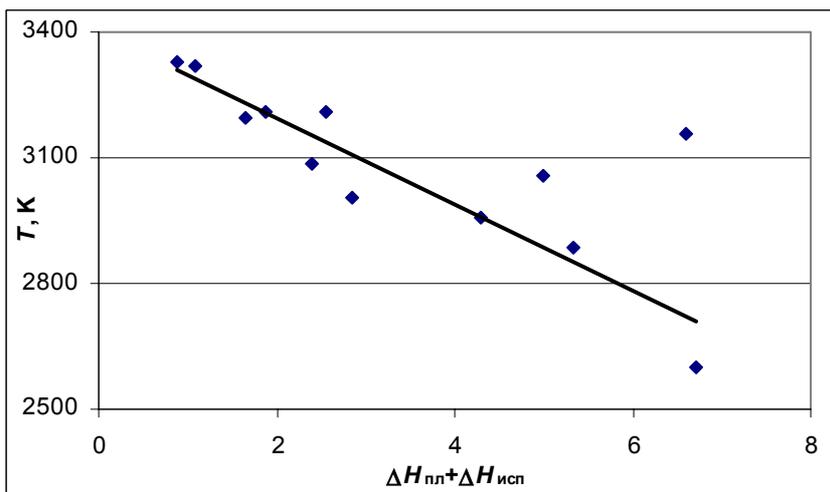


Рис. 4. Зависимость температуры  $T$  продуктов горения ПС от суммы стандартных энтальпий плавления и испарения добавленного вещества  $\Delta H_{\text{пл}} + \Delta H_{\text{исп}}$

Таблица 2. Состав исследуемых ПС (% масс.),  $0 \leq k \leq 1$

Компонент	Содержание компонентов в составе		
	$AF$	$AFM$	$AM$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	51	$51 \cdot (1-k)$	-
$\text{MoO}_3$	-	$51 \cdot k$	51
$\text{KClO}_4$	19	19	19
Al	27	27	27
$(\text{C}_2\text{F}_4)_n$	3	3	3

Найдено, что зависимость адиабатической температуры горения от концентрации  $\text{MoO}_3$  можно разбить на два участка (рис.5):  $0 \leq k \leq 0,4$  – частичная замена практически не меняет адиабатическую температуру горения  $T \sim T_{AF} = 3515 \text{ K}$ ;  $0,4 < k \leq 1$  – зависимость адиабатической температуры от содержания  $\text{MoO}_3$  близка к линейной и растет с увеличением содержания  $\text{MoO}_3$ .

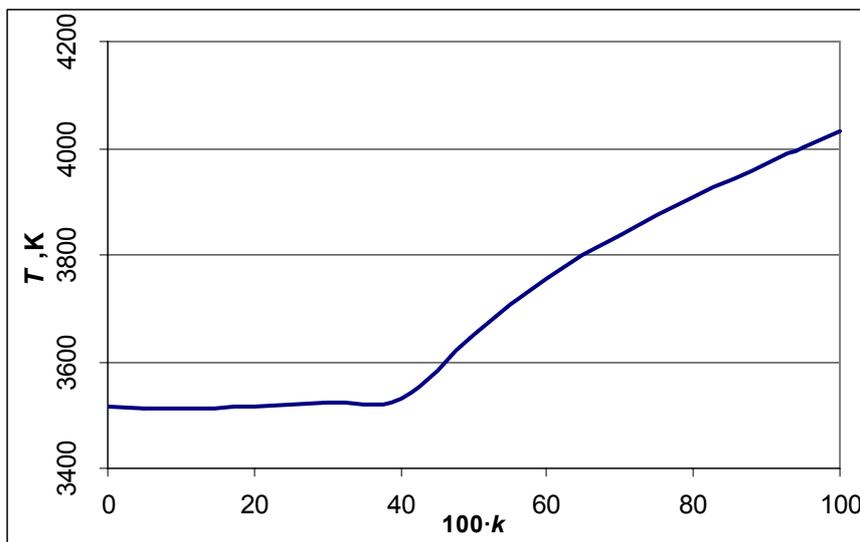


Рис. 5. Зависимость адиабатической температуры  $T$  горения ПС  $AFM$  от коэффициента замены  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на  $\text{MoO}_3$

Показано, что путем замены  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на  $\text{MoO}_3$  можно менять адиабатическую температуру горения ПС в интервале от  $T_{ад} \sim 3500 \text{ K}$  до  $T_{ад} \sim 4000 \text{ K}$ .

В тоже время, термодинамический расчет показывает, что добавление «инертного» компонента не вызывает существенного изменения соотношения конденсированной и газовой фазы продуктов горения (рис. 6). При этом добавленное вещество полностью переходит в газообразное состояние.

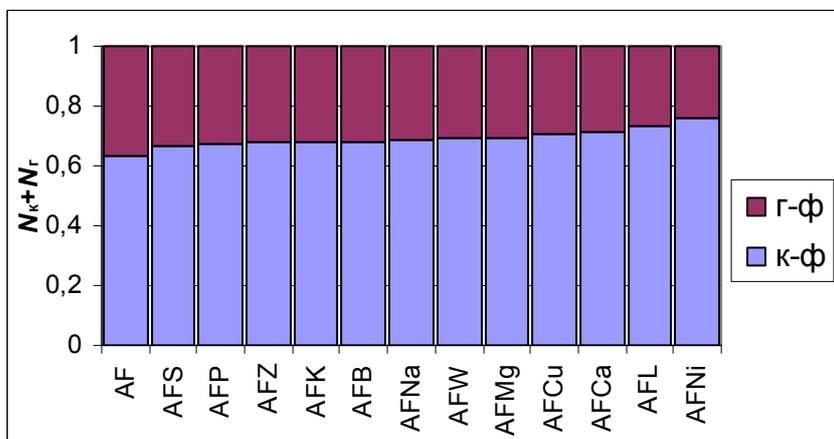


Рис. 6. Соотношение конденсированной/газовой фазы продуктов горения  $N_k$  и  $N_g$

Отклонение от стехиометрических коэффициентов содержания компонентов в базовом ПС *AF* приводит к неполному восстановлению металла, входящего в состав тугоплавкого окислителя. Такое изменение состава продуктов горения может повысить эффективность воздействия струи продуктов горения на поверхность КМ, т.к. обеспечивает увеличение (оптимизацию) соотношения твердой/жидкой фазы, необходимого для увеличения тепломеханического воздействия на преграду.

Для исследования влияния «инертной» добавки на скорость горения выбраны ПС с добавлением Ni и Zn (ПС *AFNi*, *AFZ*). Эти вещества безопасны в эксплуатации, не влекут физико-химических изменений при хранении и, что не менее важно, экономически выгодны.

Анализ зависимости скорости горения от давления показал, что добавленное «инертное» вещество уменьшает скорость горения ПС более чем в 5 раз во всем исследуемом диапазоне давлений (рис. 7). Снижение скорости горения составов связано с энергетическими потерями на плавление и испарение добавленного вещества.

Для изучения влияния природы тугоплавкого окислителя на скорость горения ПС проведены исследования с 5%, 20%, 50% и 100%-ной заменой в базовом составе  $Fe_2O_3$  на  $MoO_3$  (ПС *AFM-1*, *AFM-2*, *AFM-3* и *AM* соответственно).

Найдено, что замена  $Fe_2O_3$  на 5%  $MoO_3$  в базовом составе *AF* приводит к снижению скорости горения в 2,5 раза. Увеличение содержания оксида молибдена снижает скорость горения ПС более чем в 6 раз (рис. 8).

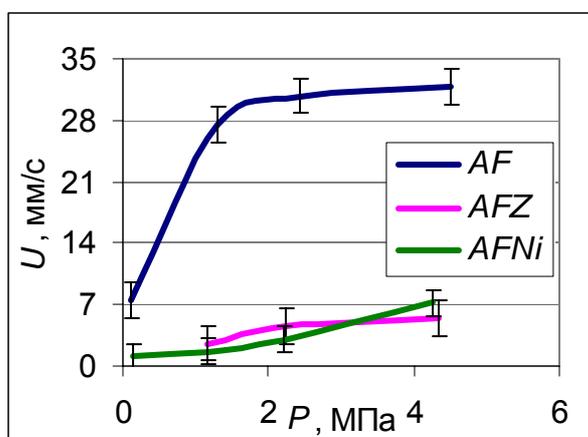


Рис. 7. Влияние «инертной» добавки на скорость горения ПС

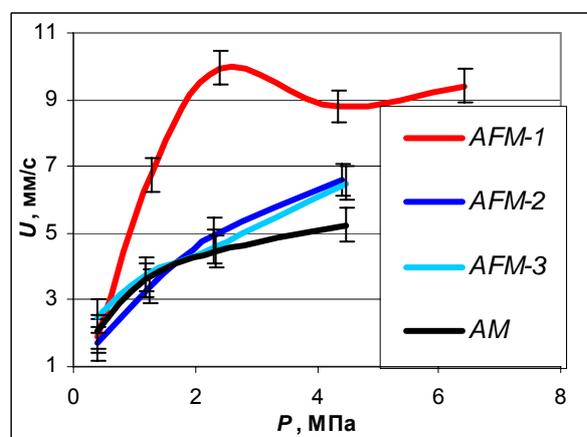


Рис. 8. Влияние природы тугоплавкого окислителя на скорость горения ПС

В пятой главе представлены результаты исследования характеристик термохимических реакций в волне горения пиротехнических составов, а также влияние дисперсности, формы и способов введения компонентов на теплопроводность и скорость горения пиротехнических смесей.

С целью определения особенностей взаимодействия компонентов в волне горения ПС проведен их термический анализ как отдельно, так и в смеси друг с другом. Анализ полученных данных позволил выделить основное различие при нагреве между  $\text{MoO}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в присутствии компонентов ПС: обнаружено, что  $\text{MoO}_3$  взаимодействует с продуктами разложения  $\text{KClO}_4$  и тефлона (образует эвтектическую смесь). Установлено, что полученная смесь активно реагирует с  $\text{Al}$  марки ПАП-1 при температурах, не превышающих  $T \sim 470^\circ\text{C}$  (наблюдается яркая вспышка, сопровождаемая разбросом продуктов реакции), что меньше температуры образования эвтектической смеси, определенной с помощью термического анализа ( $T_{\text{обр}} \sim 500^\circ\text{C}$ ).

Анализ этих данных позволил предположить следующую последовательность термохимических превращений компонентов в волне горения образца исследуемого ПС при давлении  $P = 0,1$  МПа:

- 1) от температуры окружающей среды до  $T \sim 300^\circ\text{C}$  – разогрев вещества, связанный с тепломассопереносом из зоны реакции;
- 2)  $T \sim 300^\circ\text{C}$  – полиморфный переход  $\text{KClO}_4$ ;
- 3) от  $T \sim 300^\circ\text{C}$  до  $T \sim 500^\circ\text{C}$  - разогрев вещества, связанный с тепломассопереносом из зоны реакции;
- 4)  $T \sim 500^\circ\text{C}$  - разложение  $\text{KClO}_4$  и тефлона в присутствии  $\text{MoO}_3$  (начало разложения конденсированной фазы горящего образца);
- 5)  $T \sim 500^\circ\text{C}$  – окисление  $\text{Al}$  продуктами разложения  $\text{KClO}_4$  и тефлона в присутствии  $\text{MoO}_3$  (завершение разложения конденсированной фазы горящего образца);
- 6)  $T > 500^\circ\text{C}$  – реакции, протекающие в двухфазном потоке продуктов разложения.

Таким образом, скорость горения ПС на основе изученных компонентов тем выше, чем больше удельная поверхность и чем выше реакционная способность порошка  $\text{Al}$  при температуре  $T \sim 500^\circ\text{C}$ . При выполнении этого условия в

результате окисления Al выделится большое количество тепла на поверхности горящего состава.

Для подтверждения предположения о влиянии дисперсности и формы компонентов ПС, основанного на данных термического анализа, изучено горение ПС с одинаковым массовым содержанием компонентов, но отличающиеся размером и формой частиц Al и MoO<sub>3</sub> (табл. 3).

Таблица 3. Состав (мас. %) и пористость (%) исследуемых ПС

	AM-1	AM-2	AM-3	AM-4	AM-5	AM-6	AM-7
MoO <sub>3</sub> (не измельченный)	51	51	51	51	51		
MoO <sub>3</sub> (измельченный)						51	
MoO <sub>3</sub> /Al(активированный)							70(51/19)
Al(ПП-1)				27			
Al(ПАП-1)					27	27	8
Al(ПА-3)	27		21				
Al(АСД-4)		27	6				
KClO <sub>4</sub>	19	19	19	19	19	19	19
(C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>	3	3	3	3	3	3	3
Пористость	8±2	8±2	8±2	6±2	9±2	10±2	12±2

Использованы порошки Al марки ПАП-1, ПП-1, АСД-4, ПА-3, а также порошки MoO<sub>3</sub> со средним линейным размером  $d_{cp} = 16$  мкм и  $d_{cp} = 1,5$  мкм. Состав AM-7 содержит предварительно активированную смесь алюминия и оксида молибдена. Активация проводилась путем механического измельчения стехиометрической смеси алюминия марки ПАП-1 и оксида молибдена в шаровой мельнице в течение часа. В результате активации поверхность Al покрывалась измельченным порошком MoO<sub>3</sub>.

Анализ проведенных экспериментов по определению скорости горения исследуемых составов (рис. 9) подтверждает предположение о влиянии дисперсности и формы Al на скорость горения, основанное на данных термического анализа. Минимальную скорость горения имеет состав AM-3, содержащий смесь алюминия марки ПА-3 и исходный (не измельченный) оксид молибдена.

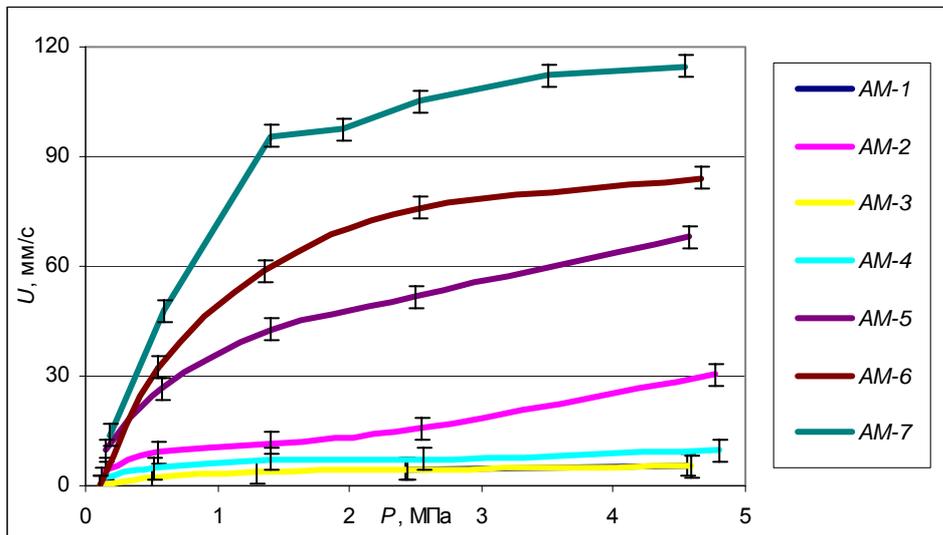


Рис. 9. Зависимость скорости горения ПС от давления

Анализ зависимостей скорости горения ПС показал, что закон горения  $U = U_0 \cdot P^v$  претерпевает существенные изменения при давлении  $P \sim 1,5$  МПа для всех составов, и не зависит от марки используемого АІ и от пористости образцов. Поэтому можно предположить, что при давлении окружающей среды  $P \cong 1,5$  МПа температура кипения продуктов разложения  $KClO_4$  и тефлона в присутствии  $MoO_3$  (эвтектическая смесь) превышает температуру на поверхности АІ на начальной стадии окисления. Частицы алюминия и окислитель (эвтектическая смесь) уносятся с поверхности горящего состава газофазными продуктами разложения  $KClO_4$  и тефлона. Это согласуется с предположением о механизме окисления алюминия, основанном на данных термического анализа и определения реакционной способности продуктов разложения компонентов ПС.

Для качественной оценки влияния размера кристаллов тугоплавкого окислителя на распределение температуры вблизи поверхности горящего образца проведен расчет температуры для двух гетерогенных конденсированных систем (ГКС), различающихся размером зоны с высокой теплопроводностью к-фазы, прилегающей к поверхности, и значением эффективной теплопроводности последующих слоев. Получено (рис. 10), что вблизи поверхности ГКС с меньшей зоной высокой теплопроводности (меньших размеров теплопроводящих кристаллов) за время  $\Delta t \sim d_{cp}/U$  формируется слой  $\Delta x \sim d_{cp}$  с более высокой температурой (запасом тепла), чем у ГКС с большей зоной высокой теплопроводности. Следовательно, скорость горения также должна быть выше. Но у ГКС с большей зоной высокой теплопроводности эффективный прогретый слой больше. Это приводит к уменьшению критического диаметра горения ГКС.

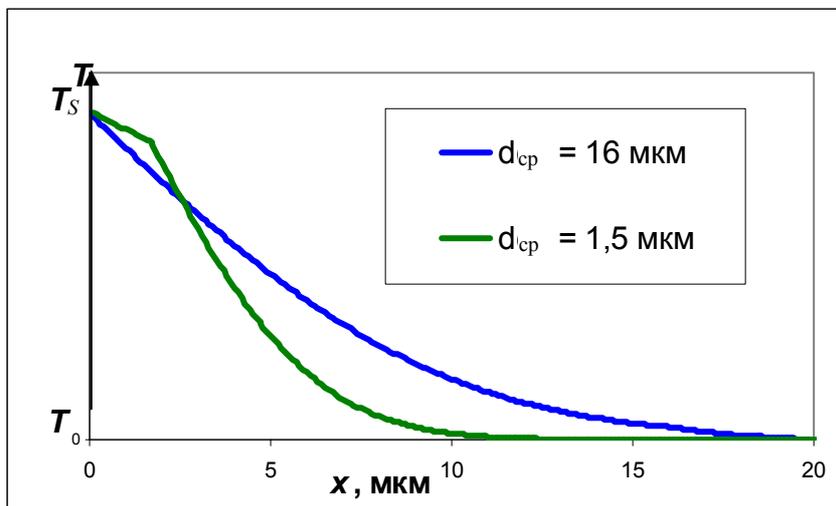


Рис.10. Зависимость температуры  $T$  от расстояния до поверхности ГКС  $x$

В шестой главе представлены результаты исследования природы компонентов на чувствительность ПС к механическим воздействиям.

На примере ПС на основе оксида железа и алюминия с добавлением цинка или никеля (ПС *AFZ* и *AFNi*) показано, что чувствительность ПС к механическим воздействиям обратно пропорциональна твердости добавляемого вещества. По результатам исследования чувствительность этих ПС изменяется незначительно. Поэтому, рассматриваемые добавки могут быть использованы для изготовления ПС и изделий на их основе без обеспечения дополнительных мер безопасности.

В тоже время обнаружено, что присутствие  $MoO_3$  повышает чувствительность ПС к механическим воздействиям. Так, при замене 2,5%  $Fe_2O_3$  на  $MoO_3$  в базовом ПС (ПС *AFM-1*) чувствительность к трению возрастает с 4-го класса до 1-го. Это означает, использование  $MoO_3$  при изготовлении ПР и изделий на их основе требует дополнительных мер безопасности. Однако добавка полиэтилена в состав ПС может быть использована для уменьшения чувствительности к механическим воздействиям: при замене 1,5% тефлона на полиэтилен (ПС *AMT-1*) чувствительность ПС к трению меняется с 1-го класса до 5-го.

В седьмой главе рассмотрено влияние физико-химических характеристик ПСПД, параметров ПР и условий окружающей среды на его работу. Даны рекомендации по компоновке пиротехнических смесей с требуемыми характеристиками горения с учетом условий их функционирования и предназначения.

Определение прожигающей способности проводилось для ПСПД *AF* и *AMT-1* (табл. 4). Состав *AMT-1* отличается от состава *AF* тем, что  $Fe_2O_3$  заменен на  $MoO_3$ , тефлон на 50% заменен на полиэтилен, но распределение частиц  $Al$  и  $KClO_4$  по размеру сохранено. Это позволило исключить влияние формы и дисперсности алюминия и перхлората калия на характеристики работы ПР.

Таблица 4. Состав исследуемых ПСПД

	<i>AF</i>	<i>AMT-1</i>
$Fe_2O_3$	51	
$MoO_3$		51
$Al(ПА-3)$	21	21
$Al(АСД-4)$	6	6
$KClO_4$	19	19
$(C_2F_4)_n$	3	1,5
$(C_2H_4)_n$		1,5

Результаты проведенных экспериментов показывают, что при одинаковой дисперсности компонентов ПСПД, массе заряда, критическом диаметре сопла и объеме камеры сгорания время работы ПР (время горения ПСПД) на основе ПСПД *AF* в 15 раз меньше времени работы ПР на основе ПСПД *AMT-1*. Это согласуется с результатами проведенных экспериментов по определению скорости горения ПС в бомбе постоянного давления.

Показано, что струя продуктов горения ПСПД *AMT-1* обладает меньшей прожигающей способностью, чем струя продуктов горения ПСПД *AF*.

Показана возможность эффективного управления характеристиками ПР (время работы, проникающая способность) путем изменения свойств струи продуктов горения ПСПД.

## *Влияние параметров ПР*

Для изучения влияния параметров ПР выбраны ПСПД *AF* и *AMT-1*. Рассмотрено два типа зарядов: торцевой и канальный.

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что применение канального типа заряда повышает среднюю массовую скорость горения состава в 10 раз по сравнению со скоростью горения торцевого. Показано, что при взаимодействии гетерогенного потока продуктов горения с преградой КМ поверхностные слои разрушаются (вымываются) быстрее, чем «глубинные».

Результаты проведенных экспериментов подтвердили возможность регулирования характеристик работы ПР путем изменения характеристик продуктов горения ПСПД, критического диаметра сопла и формы заряда.

Для пиротехнических изделий на основе состава *AMT-1* с торцевым зарядом время горения в 15 раз превышает время горения пиротехнических изделий на основе торцевого заряда состава *AF*.

Для пиротехнических изделий на основе состава *AMT-1* с канальным зарядом время горения более чем в 100 раз превосходит время горения пиротехнических изделий на основе канального заряда состава *AF*. Однако прожигающая способность состава *AMT-1* уменьшилась. Так, при массе торцевого заряда  $m = 300$  г прожигания стальной пластины толщиной 15 мм не произошло.

Можно констатировать, что эффективное регулирование характеристик работы ПР может быть достигнуто путем изменения характеристик продуктов горения ПСПД, формы и массы заряда, критического диаметра сопла.

## *Работа ПР в водной среде*

Использовались ПР, рабочим веществом которых является канальный заряд ПСПД *AF*, массой 200 г. Толщина обрабатываемой пластины (сталь) составляет 10 мм. Расстояние от сопла ПР до поверхности пластины варьировалось от 7 до 15 мм. Эксперименты проводились на глубине 800 мм от поверхности воды.

Согласно результатам проведенных экспериментов, ПР на основе ПСПД *AF* успешно могут быть использованы в водной среде для воздействия на пластину КМ, в том числе для нарушения целостности (прожига).

*Рекомендации по компоновке пиротехнических смесей с требуемыми характеристиками горения*

Основываясь на результатах анализа экспериментальных и расчетных данных, можно прогнозировать уровень значений основных характеристик продуктов горения ПС при изменении физико-химических характеристик их исходных компонентов (табл.4). При этом возможно регулирование (изменение) характеристик продуктов горения ПС в широком диапазоне значений без значительного изменения остальных свойств. Это необходимо для создания пиротехнических устройств, предназначенных для решения широкого круга задач и использования при различных условиях окружающей среды.

Табл.4. Пути и пределы изменения основных характеристик ПСПД

Минимальное значение	Пути уменьшения	Изменяемая характеристика ПС	Пути увеличения	Максимальное значение
$\rho_{гф} \sim 1 \text{ г/л}$	Исключение из состава ПС веществ, содержащих галогены в составе молекулы	Плотность газофазных продуктов реакции	Введение в состав ПС компонентов с высокой молекулярной массой	$\rho_{гф} \sim 3 \text{ г/л}$
$T_{ад} \sim 2600 \text{ К}$	Введение в состав ПС инертных компонентов	Адиабатическая температура горения	Изменение природы окислителя	$T_{ад} \sim 4000 \text{ К}$
$\rho U^2 \sim 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ г/(мм} \cdot \text{с}^2)$	Увеличение дисперсности компонентов	Скорость (кинетическая энергия) продуктов горения	Механоактивация компонентов	$\rho U^2 \sim 115 \text{ г/(мм} \cdot \text{с}^2)$
1 класс	Увеличение твердости компонентов ПС	Чувствительность ПС к механическим воздействиям	Понижение химической активности связующего в составе ПС	20 класс

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании анализа тенденций развития и совершенствования пиротехнических составов прожигающего действия сформированы требования к уровню их характеристик и изделий из них, включая такие показатели, как температура горения, плотность газофазных продуктов реакции, скорость горения, физическая стойкость, химическая стабильность, чувствительность к механическим воздействиям, токсичность компонентов и продуктов сгорания, технологичность, физико-механические характеристики.
2. Предложен алгоритм оценки возможности использования пиротехнического состава в качестве рабочего вещества в пиротехнических устройствах, предназначенных для перфорации, резки и обработки поверхности конструкционных материалов.
3. Усовершенствована методика исследования протекания термохимических реакций в волне горения ПС, заключающаяся в изучении свойств как отдельных компонентов, так и их смеси друг с другом методом термического анализа с последующим сравнительным анализом полученных данных. На основании выявленных особенностей протекания ведущих термохимических реакций в волне горения обосновано влияние свойств компонентов (в том числе дисперсности и формы) на скорость горения.
4. Изучена роль физико-химических свойств и концентрации основных компонентов в формировании основных характеристик горения пиротехнического состава и установлены масштабы влияния природы компонентов на характеристики пиротехнического состава (скорость горения, чувствительность к механическим воздействиям) и продуктов горения (плотность газовой фазы, температуру, соотношение газовой и конденсированной фазы).
5. Определено влияние физико-химических характеристик пиротехнического состава и параметров пиротехнического резака на характеристики его работы. Показана возможность использования пиротехнического резака на основе выбранного пиротехнического состава для перфорации металла при проведении работ в водной среде.

6. Разработаны научно-практические рекомендации по компоновке пиротехнических смесей с требуемыми характеристиками горения с учетом условий их функционирования и предназначения.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Иванов Д.А., Пивкина А.Н., Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Фролов Ю.В. Влияние дисперсности компонентов на параметры горения ГКС – В сб.: Тез. Международной научной конф. «Проблемы баллистики – 2006», Санкт-Петербург, 19-23 июня 2006 г., с. 47-48.
2. Ivanov D., Frolov Yu., Pivkina A., Meerov D., Monogarov K., Murav'ev N., Dilhan D. and Mudretzova S. Selection and testing of thermite compositions for pyrotechnic devices. – In: Proc. of 34<sup>th</sup> Int. Pyrotec. Sem., 8-12 October 2007, Beaune, France, pp. 711-724.
3. Ivanov D., Frolov Yu., Pivkina A., Meerov D., Monogarov K., Murav'ev N., Dilhan D. and Mudretzova S. Selection and testing of thermite compositions for pyrotechnic devices. – In: Theory and practice of energetic materials (vol.VIII), Science Press USA Inc. (Proc. of the 2007 Int. Aut. Sem. on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Xi'an, Shaanxi, China, October 23-26, 2007), pp. 301- 311.
4. Ivanov D., Frolov Yu., Pivkina A., Meerov D. and Monogarov K. Energetic nanomaterials: properties and combustion of condensed systems. – In: Novel materials and technologies for space rockets and soace development. / Eds. A.A. Berlin and I.G. Assovsky, Torus Press, Moscow 2007, pp. 274-278.
5. Иванов Д. А., Моногаров К. А., Мееров Д. Б., Муравьев Н. В., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Пиротехнические композиции для нагревательных устройств. Горение и взрыв. М.: Торус Пресс, 2008, с. 56-59.
6. Иванов Д.А., Пивкина А.Н., Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Тарасова И.П. Ультра- и наноразмерные компоненты высокоэнергетических систем: получение, структура частиц и термическое поведение. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2008. Т. 4, с. 62.
7. Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Моногаров К.А., Иванов Д.А., Муравьев Н.В., Мееров Д.Б. Пиротехнические композиции для нагревательных устройств,

Научная сессия МИФИ-2008. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2008. Т. 4, с. 63.

8. Иванов Д.А., Пивкина А.Н., Муравьев Н.В., Мееров Д.Б., Моногаров К.А. Исследование горения термитных составов. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2008. Т. 4, с. 64.

9. Иванов Д.А., Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Муравьев Н.В., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Пиротехнические устройства для разрушения конструкционных материалов. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2009. Т. 1, с. 236.

10. Иванов Д.А., Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Муравьев Н.В., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Механоактивация компонентов как способ повышения эффективности ЭКС. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2009. Т. 1, с. 237.

11. Д.А. Иванов, Моногаров К.А., Мееров Д.Б., Муравьев Н.В., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Энергетические конденсированные системы для пиронагревательных устройств. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2009. Т. 1, с. 238.

12. Орджоникидзе О.С., Моногаров К.А., Мееров Д.Б., Иванов Д.А., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Поведение компонентов и продуктов сгорания энергетических конденсированных систем при термическом нагреве. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2009. Т. 1, с. 239.

13. Моногаров К.А., Пивкина А.Н., Иванов Д.А., Мееров Д.Б., Муравьев Н.В. Влияние дисперсности компонентов на горение энергетических конденсированных систем на основе октогена и алюминия, Горение и взрыв: выпуск 2. М.: Торус Пресс, 2009, с. 110-113.

14. Иванов Д.А., Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Муравьев Н.В., Пивкина А.Н. Повышение эффективности энергоемких конденсированных систем за счет использования наноразмерных и механоактивированных компонентов. – Горение и взрыв: выпуск 2. М.: Торус Пресс, 2009, с. 114-116.

15. Пивкина А.Н., Фролов Ю.В., Иванов Д.А. Наноразмерные компоненты высокоэнергетических систем: структура, термическое поведение и горение. – Физика горения и взрыва. 2007, № 1, с. 60-65.

16. Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Моногаров К.А., Иванов Д.А., Мудрецова С.Н., Мееров Д.Б. Структура частиц и параметры горения составов с наноалюминием. – Химическая физика, 2008, № 6, с. 52-55.

17. Pivkina A., Ivanov D., Mudretsova S., Schoonman J., and Frolov Yu. Plasma synthesized nano-aluminum powders: structure, thermal properties, and combustion behavior, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2006, v. 86, No. 3, pp. 733-738