

## Особенности использования нано- и ультрадисперсных порошков окислителя в пиротехнических составах

© Д.А. Ягодников<sup>1</sup>, В.И. Томак<sup>1</sup>, В.И. Сарабьев<sup>2</sup>, И.И. Хомяков<sup>1</sup>,  
А.И. Шабунин<sup>2</sup>, С.В. Шибанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup>ФНПЦ «НИИ прикладной химии», Московская обл., г. Сергиев Посад, 141313, Россия

*Рассмотрены методология проведения огневых стендовых испытаний, алгоритм вторичной обработки и результаты исследований процессов воспламенения и горения пиротехнических составов (ПС) на основе магния и окислителя — нитрата натрия микронного и нанодисперсного размеров, их анализ и сравнение. Выполнена визуализация и сравнительный анализ газодинамической картины истечения продуктов сгорания двух типов ПС из соплового блока модельного газогенератора. Приводятся степенные законы скорости горения исследуемых ПС на основе микронного и нанодисперсного окислителя от давления. Выполнены термодинамические расчеты для определения равновесных значений температуры, газовой постоянной, относительной массовой концентрации  $\kappa$ -фазы, показателя адиабаты продуктов сгорания ПС. Установлено увеличение полноты сгорания, снижение периода задержки воспламенения пиротехнического состава и реализация более однородного потока истекающих из сопла продуктов сгорания в случае использования нанодисперсного окислителя.*

**Ключевые слова:** пиротехнические составы, нанодисперсный окислитель, вода, скорость горения, экспериментальное исследование.

Появление высокоэффективных технологий производства нанодисперсных порошкообразных материалов требует пересмотра сложившихся взглядов на области эффективного их использования. Применительно к газогенераторам, использующим в качестве источника энергии пиротехнические составы (ПС), применение нанодисперсных порошков металлических горючих, как ожидается, позволит избавиться от наиболее существенных недостатков: сложности организации рабочего процесса, больших потерь тепловой энергии за счет недогоревших крупных частиц, сильного эрозионного воздействия на элементы конструкции. К настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам горения ПС и энергетических конденсированных систем (ЭКС), в том числе и ПС, на основе ультра- и нанодисперсных компонентов, в основном алюминия [1 — 3].

Результаты исследований характеристик горения ЭКС на основе нанодисперсных окислителей приведены в единичных публикациях.

Так, например, в работе [4] исследованы характеристики горения модельных ЭКС на основе нанодисперсных алюминия и перхлората аммония (ПХА). Экспериментально установлено, что скорость горения стехиометрических смесей алюминия и ПХА, а также дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания существенно зависит от исходного размера как частиц алюминия, так и окислителя. В случае замены алюминия марки АСД-4 (среднемассовый диаметр ~ 12 мкм) на нанодисперсный со средним диаметром ~ 42 нм скорость горения ЭКС при давлении 4 МПа увеличивается с 4 мм/с до 40 мм/с. Причем, если использовать нанодисперсный ПХА, то величина скорости горения возрастет до 30 мм/с. Тем не менее в последнем случае качественным образом изменяются дисперсные и морфологические характеристики частиц к-фазы, которая становится более однородной и мелкодисперсной.

В связи с изложенным, целью данной работы является исследование процессов воспламенения и горения ПС на основе магния и окислителя — нитрата натрия микронного и нанодисперсного размеров.

Для анализа влияния замены в ПС микродисперсных на ультра- и нанодисперсные порошкообразные горючие и окислители использовались две различные рецептуры разработки и изготовления ФНПЦ «НИИ прикладной химии», отличающихся между собой размерами частиц магния и порошкообразного окислителя — нитрата натрия. Данные о составах приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристики пиротехнических составов

Состав	Дисперсность компонента	Закон горения, м/с
МС-М	Микродисперсный окислитель, микродисперсный магний	$11,34 \cdot 10^{-3} \cdot p_k^{0,406}$
МС-Н	Нанодисперсный окислитель, микродисперсный магний	$12,75 \cdot 10^{-3} \cdot p_k^{0,406}$

Примечания.  $p_k$  — давление в камере сгорания (КС), ата

Из сравнения двух близких по составу топлив, отличающихся главным образом дисперсностью окислителя и горючего, видно, что ПС на основе нанодисперсных компонентов имеет более высокую скорость горения, что согласуется с данными, приведенными в [1].

С целью получения постоянного закона горения и обеспечения примерно постоянного давления в камере сгорания использовался образец ПС торцевого горения, внешним диаметром 65 мм и длиной 105...115 мм. Подробное описание пневмогидравлической схемы, испытательного стенда, модельного газогенератора приведено в [5]. Остановимся далее только на их особенностях.

Экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис. 1, представляет собой модельный газогенератор с подведенными к нему магистралями подачи воды, являющейся окислителем по отношению к металлосодержащему ПС.

Камера сгорания (КС) выполнена по двухзонному (форкамерному) принципу и состоит из двух зон, в каждую из которых подается вода. Для проведения исследований с заданными режимными параметрами на различных типах ПС изготавливаются комплекты промежуточных и выходных сопел с различными диаметрами минимальных сечений.

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в следующем. Подготовительные операции перед проведением ОСИ начинаются со сборки газогенератора, включая размещение внутри камеры сгорания образца ПС с воспламенителем, в качестве которого используется дымный ружейный порох. Зажигание воспламенителя производилось за счет джоулева тепла, высвобождавшегося при подаче на токоведущие провода напряжения  $\sim 27$  В.

После этого происходит монтаж газогенератора на стапеле, заправка подводящих магистралей водой. Далее подключаются первичные измерительные преобразователи тяги, давления, температуры и производится их градуировка. Затем производится набор давления наддува в баке с водой. Отработка циклограммы пуска идет в следующей последовательности. Сначала практически одновременно подаются команды «Старт» и «Пуск». Команда «Старт» дает начало записи сигналов с датчиков в память ЭВМ с предварительным преобразованием измеряемых параметров датчиков (напряжение, термо-ЭДС и др.) в действительные значения измеряемых физических величин по градуировочным характеристикам всех датчиков, заложенных в память ЭВМ. Первичные преобразователи опрашиваются с частотой  $f = 10$  Гц (интервал 0,1 с). Команда «Пуск» обеспечивает подачу импульса на воспламенитель, срабатывание которого приводит к возгоранию основного состава.

Для устойчивого воспламенения ПС предусмотрена задержка подачи воды в КС. В соответствии с циклограммой время задержки подачи воды в КС — временной интервал, определяемый как разность между моментом времени подачи команды «Пуск» и моментом време-



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

ни подачи команды «Подача воды в зоны № 1 и № 2». Время задержки подачи воды является одним из основных параметров, определяющих номинальный выход на режим. С учетом опыта МГТУ им. Н.Э. Баумана по экспериментальному исследованию ПС подобного класса, задержка подачи воды изменялась в пределах от 1,0 с до 1,5 с.

В данной работе основной характеристикой эффективности рабочего процесса в КС является коэффициент расходного комплекса, определяемый как отношение экспериментального  $\beta_э$  и теоретического  $\beta_т$  значений расходного комплекса

$$\Phi_B = \frac{\beta_э}{\beta_т}.$$

Величина  $\beta_э$  определяется на основе экспериментальных данных по следующей зависимости:

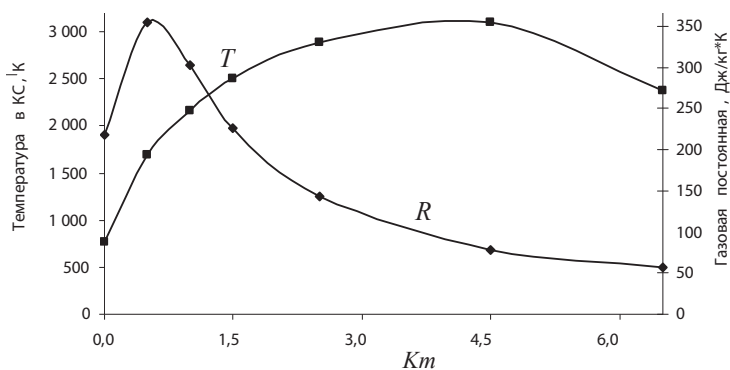
$$\beta_э = \frac{\mu_c \cdot p_k \cdot F_{кр}}{m_\Sigma}, \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Здесь  $p_k$  — значение давления в КС, Па;  $F_{кр}$  — площадь критического сечения сопла,  $\text{м}^2$ ;  $m_\Sigma$  — суммарный расход рабочего тела в КС, кг/с;  $\mu_c$  — коэффициент расхода сопла. На основании измеренного значения тяги двигателя расчетное значение  $\mu_c$  составило 0,9.

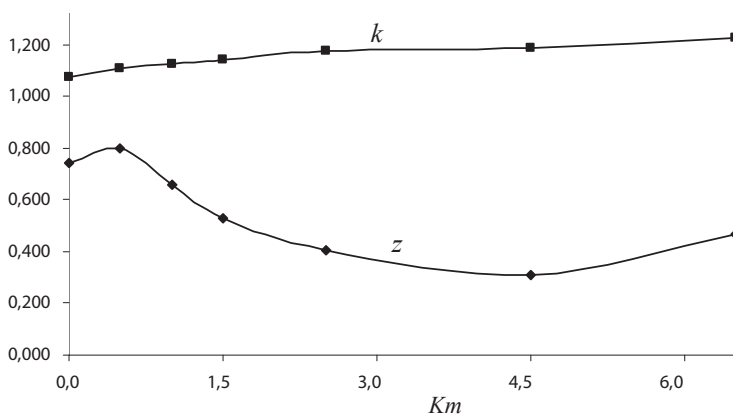
Для расчета теоретического значения расходного комплекса использовался программный комплекс «Терра-Гидра», разработанный профессором МГТУ им. Н.Э. Баумана Б.Г. Трусовым [5] и специально адаптированной под термодинамические расчеты процессов горения высокометаллизированных топливных композиций в среде водяного пара. Результаты термодинамических расчетов горения ПС в среде водяного пара представлены в графическом виде на рис. 2 и 3.

Обобщая результаты термодинамических расчетов, отметим следующее:

- Величины  $T_k$ ,  $R$  и  $\beta$  для аналогичных значений  $K_m$  рассмотренных составов близки по значениям.
- Значения величин  $T_k$ ,  $R$  и  $\beta$  для аналогичных значений  $K_m$  слабо зависят от давления в КС в рассмотренном диапазоне от 0,5 до 10 МПа.
- Характер зависимостей величин  $T_k$ ,  $R$  и  $\beta$  для рассмотренных составов подобен.
- Максимальные значения  $T_k$  для всех рассмотренных составов лежат в районе  $K_m = 0,5$ .
- Максимальные значения  $R$  для всех рассмотренных составов лежат в диапазоне  $K_m = 4 \dots 5$ .



а



б

**Рис. 2.** Зависимость температуры в КС, газовой постоянной (а), относительной массовой концентрации к-фазы, показателя адиабаты ПС (б) состава МС-М,  $p_k = 3$  МПа

• Максимальные значения  $\beta$  для всех рассмотренных составов лежат в районе  $K_m = 1$  (стехиометрическое соотношение компонентов). В частности для состава МС-М  $\beta = 1281,0$  м/с.

Необходимо отметить, что в проведенных термодинамических расчетах не учитывалось изменение энтальпии образования нанодисперсного нитрата натрия по сравнению с известными термодинамическими значениями.

Осциллограмма пуска на базовой ПС МС-М, приведенная на рис. 4, характеризуется большим заданным временем задержки подачи воды в камеру сгорания (1,5 с), а также забросом значений расходов воды, подаваемой в КС.

По нашему мнению, это связано с начальным периодом работы установки, когда вода под действием давления наддува бака заполняет

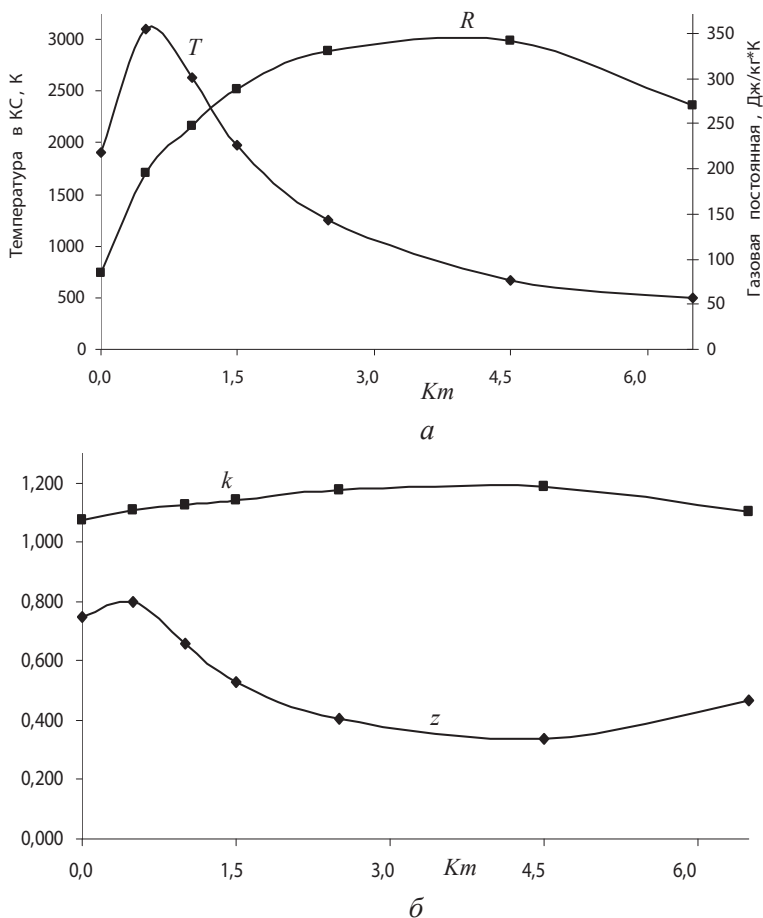


Рис. 3. Зависимость температуры в КС, газовой постоянной (а), относительной массовой концентрации к-фазы, показателя адиабаты продуктов сгорания (б) состава МС-Н,  $p_k = 3$  МПа

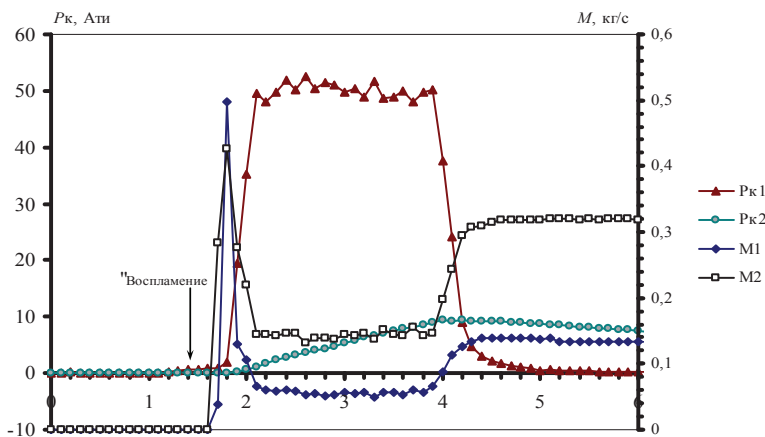


Рис. 4. Осциллограмма параметров эксперимента на МС-М.  $M$  — расход воды. Индексы 1, 2 соответствуют первой и второй зоне КС



Работа на номинальном режиме



Работа на номинальном режиме



Останов



Останов

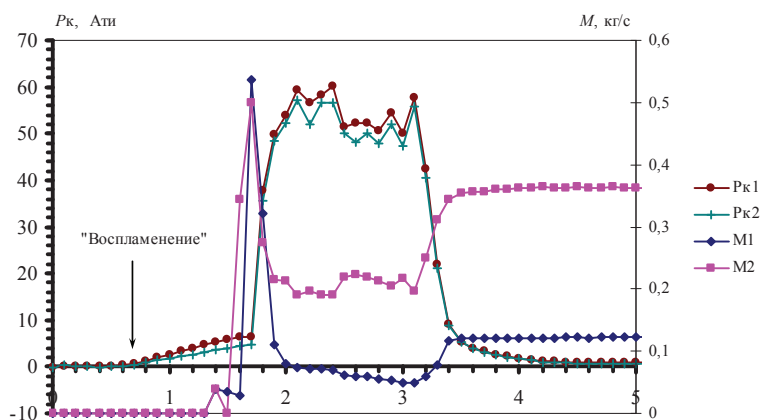
**Рис. 5.** Видеограмма пуска на базовом ПС типа МС-М

свободный зашланговый объем в водяном коллекторе после открытия отсечного клапана на водяной магистрали.

Видеограмма пуска, представленная на рис. 5, иллюстрирует работу модельной установки в период работы на номинальном режиме, а также на останове. Видеосъемка проводилась с помощью бытовой аналоговой видеокамеры Panasonic без ослабляющего светофильтра. В дальнейшем видеоряд оцифровывался с помощью платы видеотюнера и обрабатывался с помощью прикладного пакета Power-DVD.

На расчетном режиме излучение высокотемпературных продуктов сгорания приводит к засветке ПЗС-матрицы видеокамеры. Тем не менее на изображениях отчетливо видны треки, имеющие различную интенсивность свечения и траектории движения, отчетливо различимые на темном фоне. Они могут быть обусловлены, во-первых, горящими частицами магния, что подтверждается наличием искривленных треков. Во-вторых, источником излучения могут быть конгломераты, состоящие из оксида магния и недогоревшего металла.

Следующая серия ОСИ выполнена на образцах, изготовленных из ПС марки МС-Н на основе ультра- и нанодисперсного нитрата натрия. Осциллограмма ОСИ приведена на рис. 6 и свидетельствует о том, что при использовании ПС с большей скоростью горения при увеличении



**Рис. 6.** Оциллограмма параметров эксперимента на МС-Н. Обозначения аналогичны рис. 4

диаметров минимальных сечений сопел среднее давление в камере сгорания увеличилось на  $\sim 10\%$  и составило  $\sim 5,55$  МПа. Данный факт может быть обусловлен уменьшением дисперсности нитрата натрия.

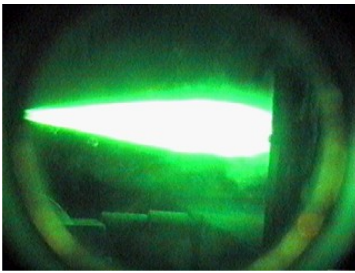
Пуск также характеризуется быстрым выходом на режим, а также меньшим временем задержки воспламенения. Так, на составе МС-М рост давления в КС начинается с 1,1 с, а на составе МС-Н с 0,6 с при одинаковом времени задержки подачи воды в камеру сгорания. Таким образом, можно заключить, что использование вместо микродисперсного нитрата натрия ультра- и нанодисперсного привело к интенсификации макрокинетических процессов воспламенения ПС.

При рассмотрении видеogramмы пуска (рис. 7), полученной в процессе видеосъемки через интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны 552,5 нм, зафиксированы отсутствие ярко выраженных треков и более значительное расширение истекающей струи продуктов сгорания. Это может быть объяснено интенсификацией процессов диспергирования образца и горения металлического горючего в КС за счет использования ультра- и нанодисперсного нитрата натрия. Заметим, что излучение продуктов сгорания также приводит к засветке ПЗС-матрицы видеокамеры.

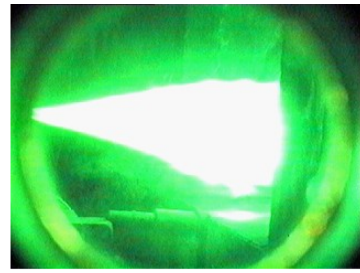
Рассмотрим далее анализ эффективности рабочего процесса в КС. Для этого использовался коэффициент расходного комплекса  $\varphi_{\beta}$ . Заметим, что величина теоретического значения расходного комплекса определялась посредством термодинамического расчета, проводимого в расчетном комплексе «Терра-Гидра» с использованием в качестве исходных данных результатов эксперимента.

Результаты сравнительной оценки степени эффективности рабочего процесса в КС по средним значениям  $p_{\kappa}$  и  $K_m$  представлены на рис. 8. Анализ рассчитанных значений  $\varphi_{\beta}$  позволяет заключить следующее.

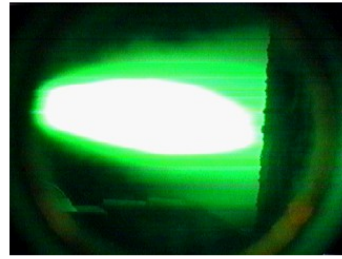
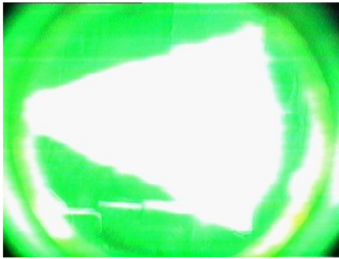




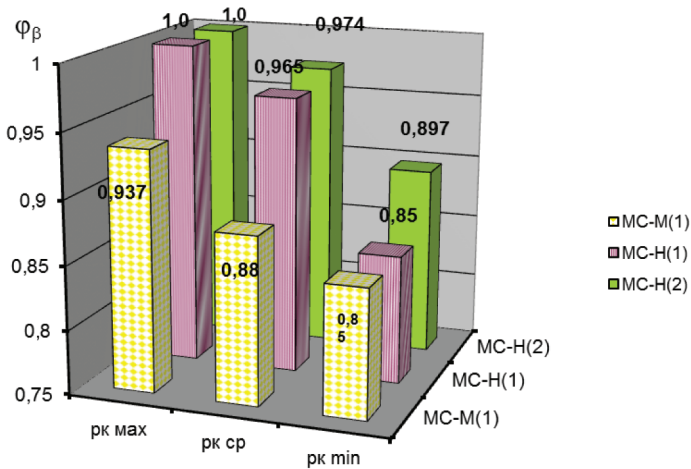
Работа двигателя



Работа двигателя



**Рис. 7.** Видеogramмы пуска на ПС типа МС-Н с ультра- и нанодисперсным окислителем



**Рис. 8.** Расчетные значения коэффициента расходного комплекса

1. Наибольшие значения коэффициента расходного комплекса оказались достаточно высокими, что свидетельствует об эффективности протекания рабочего процесса.

2. Значения коэффициента расходного комплекса сильно зависят от характера осреднения изменяющихся в процессе ОСИ давления в КС и соотношения компонентов.

3. Значения  $\varphi_{\beta}$  для минимальных, максимальных и средних давлений у ПС типа МС-Н на ультра- и нанодисперсном окислителе оказались несколько выше, чем для ПС на микродисперсном окислителе.

4. Для ПС типа МС-Н увеличение массового соотношения компонентов привело к некоторому увеличению значения  $\varphi_{\beta}$ , что согласуется с известными данными о повышении эффективности горения порошкообразного металлического горючего при обеднении топливной смеси.

Таким образом, проведенные экспериментально-теоретические исследования и испытания экспериментального газогенератора с образцами ПС позволяют сделать следующие выводы.

1. На видеокадрах истечения продуктов сгорания ПС типа МС-Н на ультра- и нанодисперсном окислителе отсутствуют светящиеся треки частиц к-фазы, в то время как для ПС типа МС-М на микродисперсном окислителе треки зарегистрированы в течение всего времени пуска.

2. Время задержки воспламенения образца состава МС-М составило 1,1 с, а состава МС-Н — 0,6 с, что обусловлено использованием ультра- и нанодисперсного нитрата натрия в последнем.

3. Значения  $\varphi_{\beta}$  для минимальных, максимальных и средних давлений у ПС типа МС-Н на ультра- и нанодисперсном окислителе оказались несколько выше, чем для ТПТ на микродисперсном окислителе, что в совокупности с приведенными выше факторами подтверждает возможность повышения энергетических характеристик ПС за счет использования нанодисперсных компонентов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ягодников Д.А. *Воспламенение и горение порошкообразных металлов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009, 432 с.
- [2] Ягодников Д.А., Игнатов А.В., Гусаченко Е.И. К вопросу использования нанодисперсных частиц алюминия в пиротехнических составах. *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение*. 2008, № 1, с. 108 — 113.
- [3] Коршунов А. В. Размерные и структурные эффекты при окислении частиц металлов. *Известия Томского политехнического университета. Серия № 3: Химия*. 2012, т. 321, с. 28 — 36.
- [4] Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Иванов Д.А., Павловец Г.Я. Наноалюминий, полученный методом электродуговой плазменной перекомденсации: структура частиц и параметры горения. *Горение и взрыв. Материалы XIII симпозиума*. Черноголовка, Изд-во ИПХФ, 2005, с. 21.
- [5] Ягодников Д.А., Игнатов А.В., Сальников Н.Е. Экспериментальная установка для определения характеристик горения гидрореагирующих топлив. *Современные проблемы пиротехники. Материалы IV Всеросс. научно-техн. Конф.* Сергиев Посад, 2007, с. 170-172.

- [6] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спецвыпуск. Программная инженерия*. 2012, с. 240 — 249.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ягодников Д.А., Томак В.И., Сарабьев В.И., Хомяков И.И., Шабунин А.И., Шибанов С.В. Особенности использования нано- и ультрадисперсных порошков окислителя в пиротехнических составах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/804.html>

**Ягодников Дмитрий Алексеевич** родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 180 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработке бесконтактных методов диагностики ракетных и реактивных двигателей. e-mail: [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

**Томак Виктор Иванович** родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, заведующий отделом ЭМ1-4 НИИ ЭМ. Автор 10 изобретений и более 20 научных работ в области экспериментальной отработки ракетных и реактивных двигателей.

**Сарабьев Виктор Иванович** родился в 1947 г., окончил Казанский химико-технологический институт им. С.М. Кирова в 1972 г. Д-р техн. наук, профессор, начальник отдела ОАО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии» — главный конструктор по направлению. Автор более 250 научных работ в области исследования и разработки пиротехнических составов и изделий на их основе.

**Хомяков Илья Игоревич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Аспирант кафедры «Ракетные двигатели». Специалист в области проектирования и отработки реактивных двигателей.

**Шабунин Александр Иванович** родился в 1976 г., окончил Тульский государственный университет в 2000 г. Канд. техн. наук, начальник лаборатории ОАО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии». Автор более 25 научных работ в области исследования и разработки твердых пиротехнических топлив и зарядов для гидро- и воздушнореактивных двигателей и низкотемпературных газогенераторов. e-mail: [lab112.niiph@yandex.ru](mailto:lab112.niiph@yandex.ru)

**Шибанов Сергей Владимирович** родился в 1985 г., окончил Московский государственный индустриальный университет в 2007 г. Научный сотрудник ОАО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии». Автор более 10 научных работ в области получения и применения ультра- и нанодисперсных компонентов в энергонасыщенных системах. e-mail: [lab112.niiph@yandex.ru](mailto:lab112.niiph@yandex.ru)