

УДК 536.46

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ МИКРО- И УЛЬТРАНАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ВО ВЛАЖНОЙ СРЕДЕ В ДВУХЗОННОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Д. А. Ягодников, А. В. Игнатов, Е. И. Гусаченко

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва, daj@bmstu.ru

Проведено экспериментальное исследование процессов воспламенения и горения пиротехнических составов на основе микро- и ультрадисперсных частиц алюминия в модельном двухзонном газогенераторе, в который в качестве окислителя подается вода. Выполнена видеосъемка истечения продуктов сгорания из газогенератора, проведены химический и дисперсный анализы конденсированных продуктов, отобранных за срезом сопла. Установлено снижение на $\approx 17\%$ содержания активного алюминия в конденсированной фазе, увеличение на $10 \div 15\%$ эффективности рабочего процесса в газогенераторе (полноты преобразования пиротехнического состава в продукты сгорания), уменьшение примерно в три раза времени задержки воспламенения образцов при замене в их составе микрочастиц алюминия ультрадисперсными частицами.

Ключевые слова: горение, микро- и ультрадисперсный алюминий, пиротехнический состав, вода, химический и дисперсный анализы, полнота сгорания.

DOI 10.15372/FGV20170103

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением совершенствования энергобаллистических характеристик металлосодержащих пиротехнических составов (ПС) является использование ультра- и нанодисперсных компонентов, позволяющих повысить полноту сгорания и дисперсность конденсированных продуктов сгорания.

Под термином «нанодисперсные материалы» подразумевают системы, в которых размер элементов (частиц, зерен, кристаллитов, пор) менее 100 нм. Этот класс материалов известен ученым уже более полувека, свидетельством чему являются результаты экспериментального исследования смесевых конденсированных систем с добавками алюминия со средним диаметром частиц 90 и 200 нм, опубликованные в ставшей классической монографии [1]. Тем не менее повышенный интерес к ним начал проявляться только в начале XXI в., когда были обоснованы и определены основные направления реализации их преимуществ по сравнению с обычными материалами, состоящими из тех же элементов.

На сегодняшний день разработано несколько способов получения металлосодержащих наноразмерных частиц, например

конденсационный и диспергирующий. Первый из них связан со «сборкой» частиц из отдельных атомов в ходе фазового превращения, разновидность которого представлена методом электродуговой плазменной перекомденсации металлов [2, 3]. Данная технология позволяет производить порошкообразные компоненты с размером частиц в диапазоне $50 \div 500$ нм и содержанием, например, активного алюминия не менее $90 \div 95\%$ [3].

Второй способ основан на измельчении или диспергировании микро- и макрообъектов до частиц наноразмерного диапазона. Например, в НИИ высоких напряжений г. Томска [4] были получены первые образцы нанодисперсного порошка алюминия путем осаждения аэрозоля после электрического взрыва проволоки. В настоящее время полученные таким методом российские нанодисперсные порошки алюминия, имеющие размер частиц ≈ 100 нм, удельную поверхность ≈ 22 м²/г и содержащие $85 \div 87\%$ активного алюминия, поставляются на рынок под торговыми марками ALEX® и L-ALEX®.

На основе информации, приведенной в многочисленных публикациях [3–20], можно утверждать, что замена промышленных алюминиевых порошков нанодисперсными в ПС значительно изменяет свойства последних. В частности, снижается задержка воспламене-

ния, увеличивается скорость горения, возможно снижение агломерации и повышение дисперсности к-фазы.

Вместе с тем в литературе отсутствуют публикации по исследованию особенностей организации рабочих процессов в энергосиловых установках при использовании ПС с добавками нанодисперсных компонентов; не сделаны количественные оценки прироста характеристик эффективности рабочего процесса в камере сгорания; не рассмотрены вопросы снижения эрозии элементов конструкции при изменении дисперсности конденсированных продуктов сгорания. Отсутствует также информация об особенностях воспламенения и горения, например, нанодисперсного алюминия в ПС, реагирующих с водой.

Цель данной работы заключается в проведении экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в модельном газогенераторе, особенностей воспламенения и горения реагирующих с водой пиротехнических составов на основе микронного и ультра-нанодисперсного порошкообразного алюминия, а также химического и дисперсного состава конденсированных продуктов сгорания.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

Характеристики порошков, полученных методом электродуговой плазменной переконденсации металлов в ГНЦ ГНИИХТЭОС [3], следующие: удельная поверхность алюминия $7.2 \text{ м}^2/\text{г}$, среднеповерхностный диаметр частиц алюминия $d_{32} = 300 \text{ нм}$, массовое содержание активного алюминия $g_{\text{Al}} = 94.6 \%$. На основе порошков нанодисперсного алюминия путем смешения с раствором фторорганического полимера были изготовлены гранулы характерного размера $\approx 500 \text{ мкм}$ (рис. 1), которые вводили в ПС.

Образцы ПС, созданные по технологии, разработанной в НИИ прикладной химии, г. Сергиев Посад [10], состоят из нанодисперсного (состав ПС-нм) и микронного (состав ПС-мкм) порошков алюминия. В качестве последнего выбран промышленный порошкообразный алюминий ПА-1 с $g_{\text{Al}} = 99 \%$ и $d_{32} = 350 \text{ мкм}$. Некоторые характеристики исследуемых ПС приведены в табл. 1.

С целью получения постоянного закона горения ПС использовали образцы торцевого горения диаметром 42 мм, забронированные по

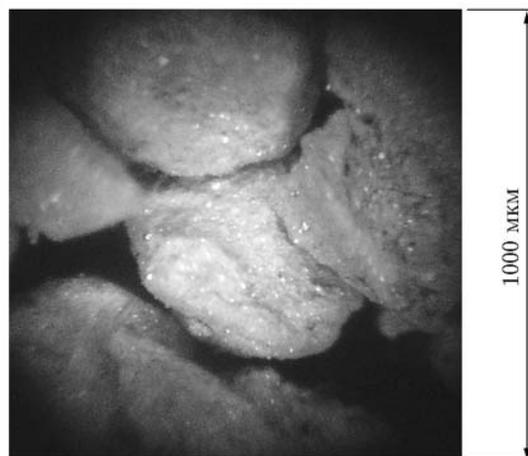


Рис. 1. Фотография частиц

Таблица 1
Характеристики пиротехнических составов

Состав	Алюминий	d_{32}	Закон горения, м/с (p — [атм])
ПС-мкм	ПА-1	350 мкм	$4.82 \cdot 10^{-3} \cdot p^{0.29}$
ПС-нм	Ультрананодисперсный	300 нм	$5.22 \cdot 10^{-3} \cdot p^{0.3}$

наружной цилиндрической и передней торцевой поверхностям.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились на модельном газогенераторе (рис. 2), в переднем узле которого размещался образец ПС и через патрубки подавалась вода в качестве основного окислителя. Газогенератор, выполненный по двухзонной схеме, закреплялся на вертикальном стапеле, позволяющем регистрировать развиваемое усилие (тягу).

Давление среды в первой зоне измеряется через штуцер. Одним из основных элементов газогенератора является узел распыливания воды, состоящий из двух независимых коллекторов и струйных форсунок. В первой зоне размещены три струйные форсунки с диаметром отверстий 0.6 мм каждая, во второй — шесть форсунок с диаметром отверстий 0.7 мм. Соединения узлов позволяют изменять различные геометрические параметры системы (диаметр и количество форсунок, свободный объем газогенератора и др.).

В состав узла распыливания также входит промежуточное сопло, вкладыш которого изго-

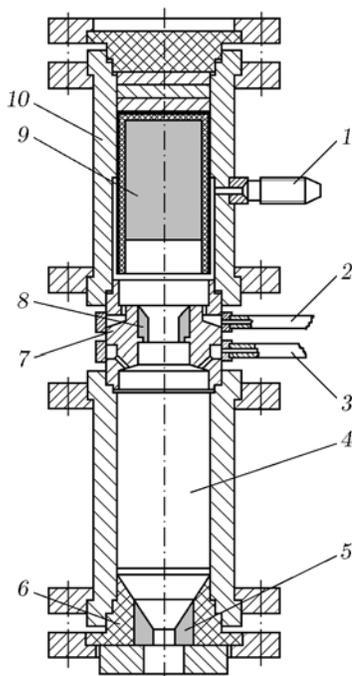


Рис. 2. Схема модельного газогенератора:

1 — штуцер для замера давления, 2, 3 — патрубки подвода воды, 4 — задний узел, 5 — вкладыш соплового блока, 6 — сопловой блок, 7 — узел распыливания воды, 8 — вкладыш промежуточного сопла, 9 — образец ПС, 10 — передний узел

товлен из графита. Диаметр проходного сечения выбран равным 16 мм, но может быть изменен путем замены вкладыша. Функция промежуточного сопла заключается в разделении объема газогенератора на две зоны, а также в создании градиента скорости потока. В первой зоне реализуется взаимодействие ПС с водой при стехиометрическом соотношении компонентов. Рабочее тело, проходя через промежуточное сопло, ускоряется, за счет чего происходит более интенсивное перемешивание его составляющих, а также дробление капель воды. Такая двухзонная схема организации рабочего процесса обеспечивает догорание во второй зоне продуктов, образовавшихся в первой зоне, и способствует повышению эффективности рабочего процесса в целом.

К заднему фланцу корпуса газогенератора подсоединен сопловой блок со сменным графитовым вкладышем диаметром 8 мм, в критическом сечении которого продукты сгорания ускоряются до скорости звука. Поскольку основная задача работы заключалась в исследовании внутрикамерного рабочего процесса, сопловой блок изготовлен без расширяющейся

части.

Для оценки эффективности рабочего процесса в газогенераторе использовался коэффициент расходного комплекса φ_β , равный отношению теоретического и экспериментального значений расходного комплекса. Этот коэффициент определяет максимально возможное значение давления p в газогенераторе при заданных суммарном расходе рабочего тела \dot{m}_Σ и площади критического сечения сопла F_{cr} , а также реализуемую в эксперименте полноту сгорания ПС [21]:

$$\varphi_\beta = \frac{\mu p F_{cr}}{\dot{m}_\Sigma \beta}.$$

Здесь μ — коэффициент расхода сопла, β — теоретическое значение расходного комплекса, рассчитанное по программе «Терра» [22] с использованием в качестве исходных данных результатов эксперимента: массового соотношения компонентов топлива K (отношение суммарного массового расхода воды $\dot{m}_{\Sigma в}$ к массовому расходу ПС $\dot{m}_{ПС}$) и давления в газогенераторе.

Система измерения регистрирует расход подаваемой в каждую зону воды и давление в газогенераторе с предельной погрешностью ± 2.2 и ± 3.2 % соответственно. Погрешности косвенных измерений соотношения компонентов и коэффициента расходного комплекса составляют ± 4.5 и ± 5.1 % соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Осциллограмма давления p и расходы воды в первую и вторую зоны \dot{m}_1 , \dot{m}_2 при испытании состава ПС-мкм представлены на рис. 3,а. Характерной его особенностью является большое время задержки воспламенения. Кроме того, наблюдается «заброс» давления в газогенераторе, что, по нашему мнению, связано с особенностями горения воспламенительного состава и медленным воспламенением образца ПС-мкм. Следствием этого стало уменьшение массового расхода воды, поступающей в первую и вторую зоны, и уменьшение давления в газогенераторе. Среднее значение давления в нем при стационарном режиме горения составило 0.63 МПа. Среднее соотношение компонентов в первой зоне и суммарное соотношение компонентов в газогенераторе соответствует $K_1 = 1.9$ и $K_\Sigma = 5.24$. Параметр φ_β , характеризующий эффективность рабочего процесса в

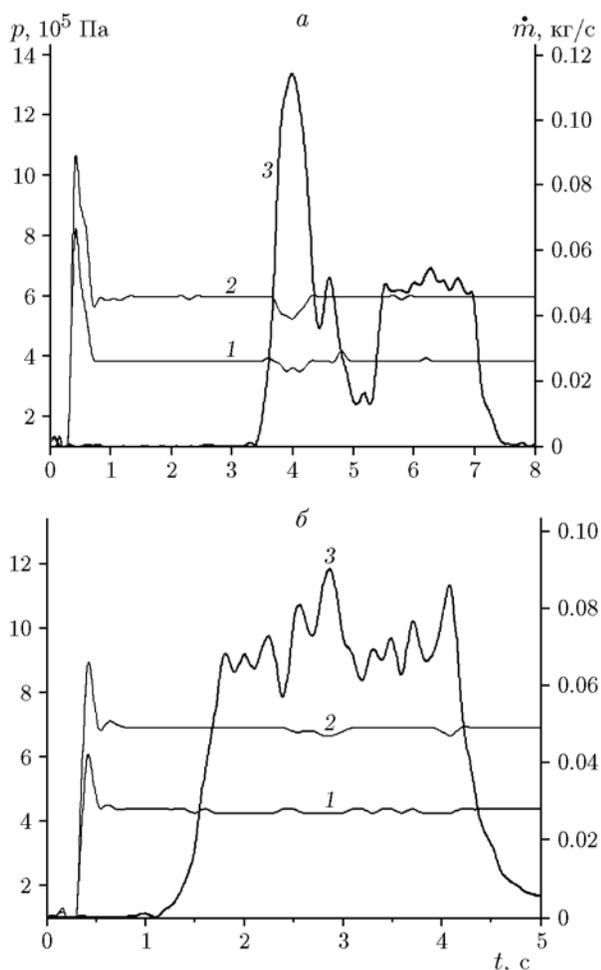


Рис. 3. Осциллограмма параметров эксперимента при использовании ПС на основе алюминия микронного размера (а) и на основе ультрадисперсного алюминия (б):

1 — расход воды в зону 1, 2 — расход воды в зону 2, 3 — давление в камере сгорания

газогенераторе, рассчитанный при максимальном (0.69 МПа) и минимальном (0.61 МПа) давлении, равен 0.63 и 0.58 соответственно.

Осциллограмма процесса при испытании состава ПС-нм представлена на рис. 3,б. По сравнению с составом ПС-мкм данный эксперимент характеризуется плавным выходом на режим и меньшим временем задержки воспламенения $\tau_{ind} \approx 1.14$ с (при испытании образца ПС-мкм $\tau_{ind} \approx 3.15$ с). Среднее давление в газогенераторе составило 0.94 МПа при среднем соотношении компонентов в первой зоне $K_1 = 1.5$ и суммарном соотношении компонентов во второй зоне $K_{\Sigma} = 4.2$. Значения φ_{β} , рассчитанные при максимальном (1.17 МПа) и мини-

мальном (0.77 МПа) давлении, равны соответственно 0.75 и 0.62, что свидетельствует о повышении эффективности рабочего процесса в газогенераторе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИДЕОСЪЕМКИ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ СОПЛА

На рис. 4,а приведены характерные кадры видеосъемки истечения продуктов сгорания ПС-мкм из соплового блока. Они иллюстрируют последовательную смену режимов: горение воспламенительного состава и работа в номинальном режиме. Видеogramмы позволяют определить момент окончания воспламенения ПС и выхода модельного газогенератора на режим, характеризующийся исчезновением крупных треков, обусловленных догоранием частиц воспламенителя, и резким сужением струи. Кроме того, изображения свидетельствуют о наличии пульсаций факела, вызванных пульсациями давления в камере сгорания.

Отдельные кадры видеосъемки сгорания образца ПС-нм представлены на рис. 4,б. В данном эксперименте также зарегистрированы треки на стадии воспламенения. Анализ видеок кадров позволяет сделать вывод об увеличении яркости излучения факела продуктов сгорания и о некотором уменьшении толщины треков частиц, истекающих из сопла при работе газогенератора в номинальном режиме, что обусловлено использованием ПС на основе алюминия большей дисперсности.

АНАЛИЗ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Исследуемые образцы конденсированных продуктов сгорания были отобраны на лист из нержавеющей стали размером 300 × 400 мм, который устанавливался на всё время процесса в поток за срезом сопла газогенератора. Время горения зарядов составляло $\approx 3 \div 3.5$ с. Методики химического, дисперсного анализов состава конденсированных продуктов сгорания разработаны в ИПХФ РАН и подробно изложены в работе [23].

Для удаления активного алюминия образцы помещали в тефлоновый стакан, заливали дистиллированной водой, по каплям добавляли раствор соляной кислоты. Выделение пузырьков из образца ПС-мкм в присутствии кислоты закончилось через 20 суток, из образца

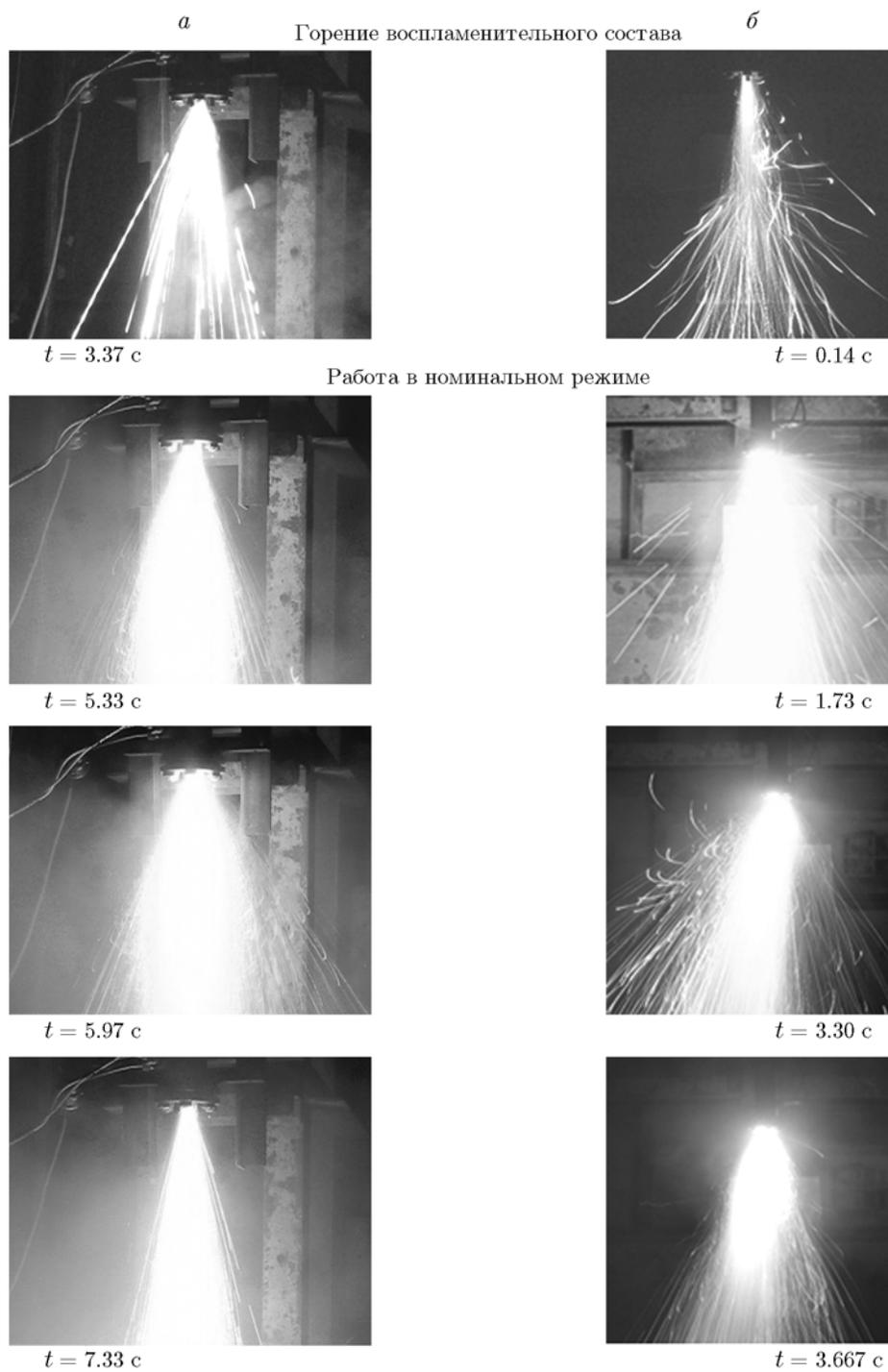


Рис. 4. Видеogramмы испытаний состава ПС-мкм, $K_{\Sigma} = 5.24$, $\langle p \rangle = 0.63$ МПа (*a*), и состава ПС-нм, $K_{\Sigma} = 4.2$, $\langle p \rangle = 0.94$ МПа (*б*) (частота съемки 25 кадр/с)

Таблица 2

Изменение массы частиц конденсированной фазы при выполнении операций

Образец	Промывание и травление			Прокаливание		
	Исходная масса, мг	Потеря массы, мг	Уменьшение массы, %	Исходная масса, мг	Потеря массы, мг	Уменьшение массы, %
ПС-мкм ¹	125.1	99.1	79.2	19.9	0.7	3.5
ПС-нм ²	137.5	84.7	61.6	45.3	1.6	3.5

Условия эксперимента: ¹K_Σ = 4.9, p = 0.42 МПа, ²K_Σ = 4.2, p = 0.94 МПа.

Таблица 3

Массовая доля частиц фракций после травления и прокаливания

Состав	Исходная масса, мг	Масса частиц фракций, мг			Массовая доля фракций, %		
		0 ÷ 4 мкм	4 ÷ 50 мкм	50 ÷ 500 мкм	0 ÷ 4 мкм	4 ÷ 50 мкм	50 ÷ 500 мкм
ПС-мкм	18.5	6.6	10.5	0.5	37.5	59.7	2.8
ПС-нм	44.7	8.8	34.1	0.7	20.2	78.2	1.6

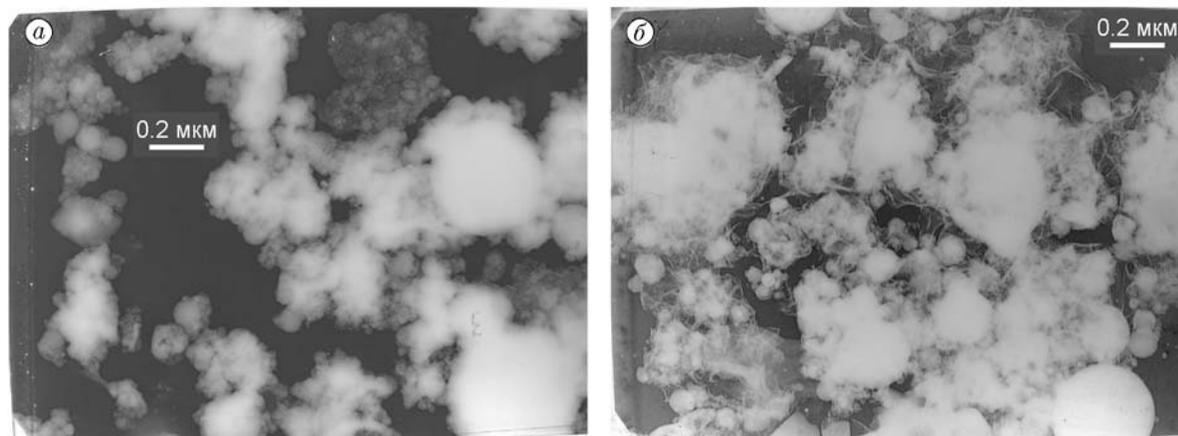


Рис. 5. Частицы фракции размером мельче 4 мкм продуктов сгорания образцов ПС-мкм (а) и ПС-нм (б)

ПС-нм — на трое суток раньше. Взвешивание после этой операции показало снижение массы образцов ПС-мкм и ПС-нм соответственно на 79.2 и 61.6 % (табл. 2). По мнению авторов, это связано в основном с растворением активного металла соляной кислотой. Поскольку скорость реагирования алюминия намного больше скорости реагирования оксидов, зарегистрированное уменьшение массы обусловлено химическим превращением непрореагировавшего алюминия. Таким образом, можно сделать вывод, что использование в качестве горючего ультра-нанодисперсного алюминия приводит к уменьшению количества активного алюминия в кон-

денсированных продуктах сгорания и, следовательно, к повышению полноты сгорания металла ПС. В целях удаления из образцов сажи после травления их прокаливали на воздухе при температуре муфельной печи 750 °С. Масса промытых и протравленных образцов уменьшилась на 3.5 % для обоих составов (см. табл. 2).

Гранулометрическому анализу подвергали промытые, протравленные и прокаленные частицы. Вначале путем сочетания седиментационного разделения и ситового отсева были выделены три фракции частиц: мельче 4 мкм, 4 ÷ 50 мкм, 50 ÷ 500 мкм. Частицы крупнее

Таблица 4

Среднестатистические размеры частиц конденсированной фазы после травления и прокаливания

Состав	Фракция 0 ÷ 4 мкм					Фракция 4 ÷ 50 мкм					Фракция 50 ÷ 500 мкм				
	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{32}	d_{43}	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{32}	d_{43}	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{32}	d_{43}
ПС-мкм	0.26	0.31	0.38	0.58	0.85	6.8	7.8	9.3	13.3	18.9	72	77	85	104	150
ПС-нм	0.23	0.28	0.34	0.53	0.74	7.2	8.2	9.4	12.6	17.3	88	94	100	115	140

Примечание. d_{10} — среднесчетный диаметр, d_{20} — среднеквадратичный диаметр, d_{30} — среднеобъемный диаметр, d_{32} — среднеповерхностный диаметр, d_{43} — среднемассовый диаметр; размер диаметров — микрометры.

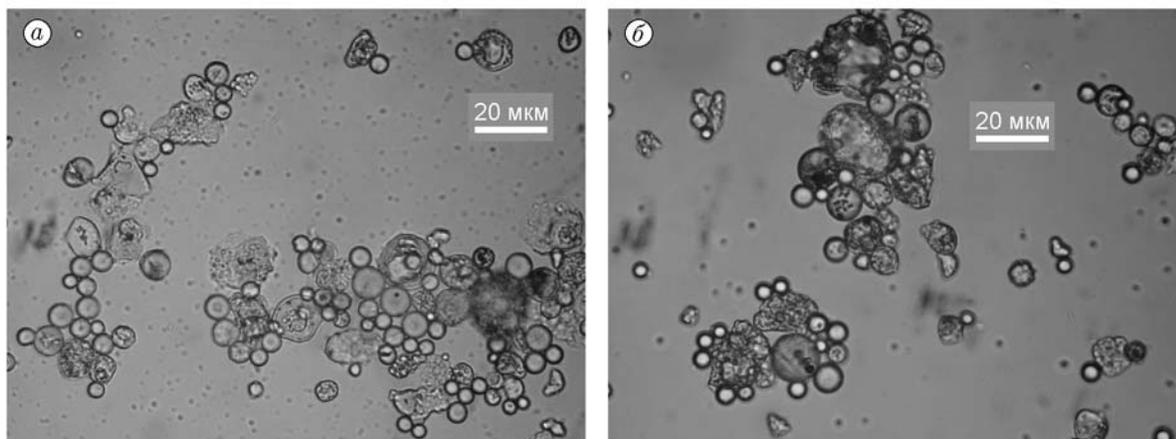


Рис. 6. Частицы фракции 4 ÷ 50 мкм продуктов сгорания образцов ПС-мкм (а) и ПС-нм (б)

500 мкм в конденсированных продуктах сгорания, отобранных за срезом сопла газогенератора, не обнаружены. Массовые доли фракций приведены в табл. 3. Суммарные потери массы частиц при фракционировании составили 4.9 и 2.5 % для образцов ПС-мкм и ПС-нм соответственно. Этими значениями можно оценить точность определения массовой доли выделенных фракций.

Затем частицы фракции мельче 4 мкм измеряли с использованием электронного микроскопа ЭМБ-100БР с увеличением до 10^5 , а частицы фракций крупнее 4 мкм — с использованием оптического микроскопа МБИ-6. Для измерения применяли прозрачный трафарет с набором окружностей. Общее число измеренных в каждой фракции частиц составило около 1500. На основе этой первичной информации рассчитывали средние диаметры с погрешностью статистической обработки $\pm 10\%$. Размер частиц, форма которых отличалась от сферической, определяли подобным же образом, только в этом случае визуально оценивали соответ-

ствие площадей изображения частицы и площадей соседних окружностей трафарета. Частицы, три размера которых отличаются не более чем на 30 %, названы частицами произвольной формы.

Фракция мельче 4 мкм состоит в основном из частиц, имеющих близкую к сферической форму (рис. 5), количество которых в к-фазе образцов ПС-мкм и ПС-нм составляет 99 и 100 % соответственно. Одно из отличий частиц к-фазы образцов ПС-мкм от ПС-нм заключается в наличии на мелких и крупных частицах ПС-нм слоя толщиной $0.10 \div 0.15$ мкм, который электризуется под пучком электронов, ухудшая качество изображения частиц. Средние размеры частиц фракции мельче 4 мкм, приведенные в табл. 4 для к-фазы двух исследуемых образцов, отличаются незначительно.

Фракция 4 ÷ 50 мкм представлена частицами сферической формы (93 и 91.2 % в к-фазе ПС-мкм и ПС-нм соответственно), а также частицами произвольной формы с округлыми или острыми гранями, ребрами и углами. Боль-

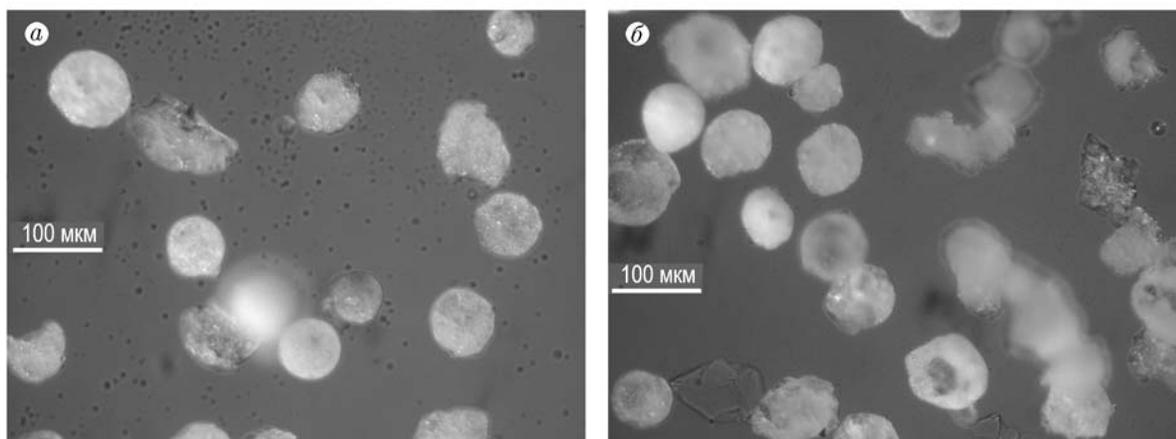


Рис. 7. Частицы фракции $50 \div 500$ мкм продуктов сгорания образцов ПС-мкм (а) и ПС-нм (б)

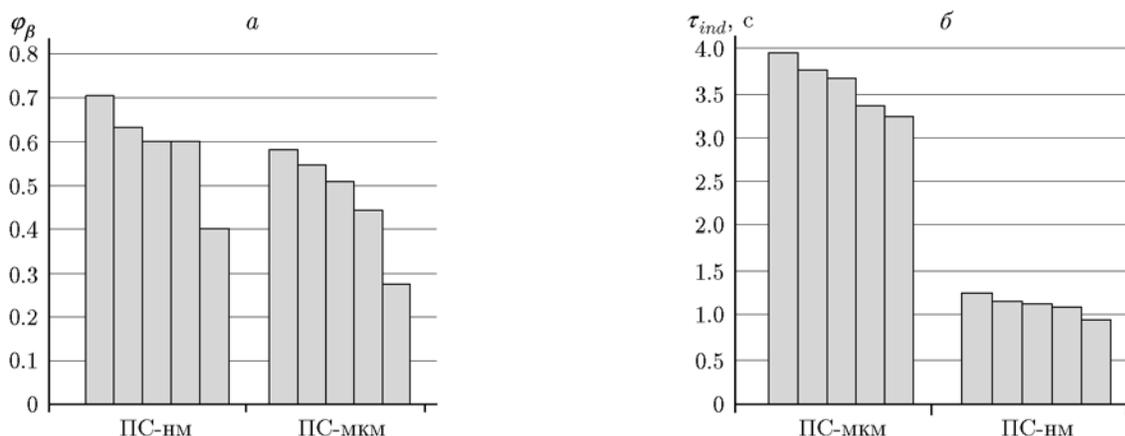


Рис. 8. Сравнение результатов серии из пяти испытаний составов ПС-нм и ПС-мкм: а — коэффициент расходного комплекса, б — время задержки воспламенения

шинство частиц прозрачные (рис. 6) в проходящем свете и белые — в отраженном. Сравнивая изображения частиц продуктов сгорания образцов ПС-мкм и ПС-нм (см. рис. 6, а, б), можно заключить, что внешне они подобны. Средние размеры частиц приведены в табл. 4.

Фракция частиц $50 \div 500$ мкм представлена в основном частицами сферической и произвольной форм из пористого прозрачного материала (рис. 7, см. табл. 4). Поскольку изучаемые частицы получены после травления и прокалывания крупных исходных частиц, можно предположить, что большинство частиц произвольной формы состоят из оксида алюминия. В к-фазе образца ПС-нм содержится меньшее количество (49.6 %) сферических частиц по сравнению с образцом ПС-мкм (84.4 %). Кроме того, в обоих образцах присутствуют сферические

частицы темного цвета, поверхность которых гладкая и блестящая.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Результаты сравнения эффективности рабочего процесса в газогенераторе в серии из пяти экспериментов по коэффициенту расходного комплекса φ_{β} , рассчитанного по средним значениям p и K_{Σ} , представлены на рис. 8, а. Видно, что максимальное значение φ_{β} достигается при использовании состава ПС-нм, оно на $\approx 10 \div 15$ % превышает значение φ_{β} для состава ПС-мкм.

Анализ осциллограмм, приведенных на рис. 3, показал, что использование нанодисперсного алюминия в образце ПС-нм приводит

к уменьшению времени задержки его воспламенения (рис. 8, б), поскольку частицы ультра- и нанодисперсного размера имеют значительно меньшие характерные времена индукции воспламенения — примерно в три раза по сравнению с базовым образцом ПС-мкм.

ВЫВОДЫ

1. При использовании в качестве горючего ультра-нанодисперсного алюминия повышается полнота сгорания ПС, что обуславливает уменьшение на $\approx 17\%$ содержания активного алюминия в к-фазе при прочих равных условиях.

2. Результаты сравнения эффективности рабочего процесса в газогенераторе по коэффициенту расходного комплекса свидетельствуют, что его значение при использовании ПС-нм превышает на $\approx 10 \div 15\%$ значение для состава ПС-мкм.

3. Экспериментально зафиксировано снижение примерно в три раза времени задержки воспламенения ПС на основе ультра-нанодисперсного алюминия по сравнению ПС на основе алюминия микронного размера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. — М.: Наука, 1972.
2. Пат. 2068400 РФ. МКИ²⁷ В 82 В 3/00. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления / Павловец Г. Я., Егоров Н. К., Малашин С. И. и др. — № 345909; Заявл. 12.02.1996; Оpubл. 28.10.1996; НКИ 78-706.
3. Федоров С. Г., Гусейнов Ш. Л., Стороженко П. А. Нанодисперсные порошки металлов в энергетических конденсированных системах // Рос. нанотехнологии. — 2010. — Т. 5, № 9-10. — С. 27–39.
4. Назаренко О. Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / под ред. А. П. Ильина. — Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2005.
5. Джараман К., Чакраварти С. Р., Сарати Р. Накопление наноразмерного алюминия при горении твердотопливных композиций // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 26–35.
6. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. — М.: Химия, 2000.
7. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. — М.: Физматлит, 2005.
8. Горение нанопорошков металлов / А. А. Громов, Т. А. Хабас, А. П. Ильин и др. — Томск: Изд-во «Дельтаплан», 2008.
9. Генералов М. Б. Криохимическая нанотехнология. — М.: Академкнига, 2006.
10. Емельянов В. Н., Сарабьев В. И., Конюхов Б. Н. и др. Технологические характеристики высокометаллизированных пиротехнических топлив с использованием ультрадисперсного алюминия // Современные проблемы пиротехники: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф., Сергиев Посад, 2007. — С. 102–103.
11. Бернер М. К., Зарко В. Е., Талавар М. Б. Наночастицы энергетических материалов: способы получения и свойства (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 3–30.
12. Ivanov Y. F., Osmonoliev M. N., Sedoi V. S., Arkhipov V. A., et al. Production of ultra-fine powders and their use in high energetic compositions // Propell., Explos., Pyrotech. — 2003. — V. 28, N 6. — P. 319–333.
13. Фролов Ю. В., Пивкина А. Н., Иванов Д. А. и др. Наноалюминий, полученный методом электродуговой плазменной переконденсации: структура частиц и параметры горения // Горение и взрыв: материалы XIII симпоз. — Черноголовка, 2005. — С. 21.
14. Жигач А. Н., Лейпунский И. О., Кусков М. Л. и др. Установка для получения и исследования наночастиц металлов // Приборы и техника эксперимента. — 2000. — № 6. — С. 122–129.
15. Ягодников Д. А., Антонов Ю. В., Пырлин С. В. Использование нанодисперсных компонентов в ракетных топливных композициях и пиротехнических составах // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Наноинженерия. — 2010. — С. 110–117.
16. Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А. Б., Седой В. С., Бабук В. А. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 80–94.
17. Terper F., Kaledin L. A. Combustion characteristics of kerosene containing ALEX[®] nanoaluminum // Unsteady Combustion and Interior Ballistics. — St. Petersburg, 2000. — P. 320–325.
18. Palaszewski B. Nanotechnology and gelled cryogenic fuels // NASA John H. Glenn Research Center. — Cleveland, 2001. — P. 234–239.
19. Розенбанд В., Гани А. Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 34–39.
20. Комарова М. В., Козырев Н. В., Бояринова Н. В., Передерин Ю. В., Вакутин А. Г. Исследование свойств высокоэнергетических композиций, содержащих наноалюминий,

- модифицированный производными нитротриазолов // Ползуновский вестн. — 2015. — № 4 (1). — С. 102–105.
21. **Бобров А. Н., Попов И. В., Ягодников Д. А.** Воспламенение и горение двухкомпонентной газозвеси порошкообразных горючего и окислителя // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 3–7.
22. **Белов Г. В., Трусов Б. Г.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.
23. **Ягодников Д. А., Гусаченко Е. И.** Влияние внешнего электрического поля на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 4. — С. 80–86.

*Поступила в редакцию 27/III 2015 г.,
в окончательном варианте — 28/IV 2016 г.*
