

Д. А. Я г о д н и к о в, А. В. И г н а т о в

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ АЛЮМИНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик горения энергетических конденсированных систем на основе ультра- и нанодисперсных частиц алюминия (удельная поверхность $7,2 \text{ м}^2/\text{кг}$). Экспериментально зафиксировано увеличение коэффициента расходного комплекса на $\sim 10 \dots 15\%$ и снижение примерно в 3 раза времени задержки воспламенения энергетических конденсированных систем на основе нанодисперсного порошкообразного алюминия по сравнению с системами на основе алюминия микронного диапазона.

E-mail: daj@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: энергетические конденсированные системы, наночастицы, алюминий, горение.

Одна из трудностей, связанных с использованием металлов в качестве горючих, — это большие периоды воспламенения частиц, проблемы при реализации высоких полнот сгорания, эрозионное воздействие конденсированных продуктов сгорания на элементы проточной части энергетической установки. В связи с этим неизменно актуальной является разработка физико-химических методов, внедрение которых позволит снизить энергетические потери и эрозионный унос конструкционных материалов. Одним из возможных путей противодействия указанной проблеме является повышение уровня дисперсности металлических горючих в составе твердотопливных композиций [1, 2].

Цель настоящей работы заключается в проведении сравнительных исследований горения во влажной окислительной среде энергетических конденсированных систем (ЭКС) на основе микродисперсного, а также ультра- и нанодисперсного порошкообразного алюминия (МДА и НДА).

В таблице приведены характеристики изготовленных по технологии ФНПЦ НИИПХ [1] пиротехнических составов, которые использовались при проведении испытаний в модельной камере сгорания.

Таблица

Характеристики пиротехнических составов

Маркировка состава	Средний размер частиц алюминия	Массовая доля алюминия	Закон горения, м/с
С-мкм	335 мкм	0,54	$4,82 \cdot 10^{-3} p_k^{0,29}$
С-нм	300 нм	0,54	$5,22 \cdot 10^{-3} p_k^{0,3}$

Характеристики ультра- и нанодispersных порошков, полученных в ГНИИХТЭОС по технологии, предложенной в работе [3], и использованных в рецептурах при испытаниях, следующие: удельная площадь поверхности порошка $S_{уд} = 7,2 \text{ м}^2/\text{г}$; среднемассовый диаметр частиц алюминия $d_{43} = 300 \text{ нм}$; массовое содержание активного алюминия $g_{Al} = 94,6 \%$.

На основе наработанных партий порошков алюминия были изготовлены гранулы-конгломераты путем смешения металлических порошков с раствором полимера. Общий вид конгломератов приведен на рис. 1.

Для проведения экспериментальных исследований характеристик горения ЭКС разработан испытательный стенд и модельный ракетный двигатель [4], выполненный по двухзонной схеме и предусматривающий подачу воды в каждую зону камеры сгорания.

Из осциллограммы пуска (рис. 2) следует, что выход на режим является достаточно плавным и наблюдается меньшее время задержки воспламенения. Среднее значение давления составило $0,94 \text{ МПа}$ при среднем суммарном соотношении компонентов $K_{m\Sigma} = 4,2$. Соотношение компонентов в первой зоне $K_{m1} = 1,5$.

Для оценки степени совершенства рабочего процесса в камере сгорания использовался коэффициент расходного комплекса φ_β :

$$\varphi_\beta = \frac{\mu_c p_k F_{кр}}{\dot{m}_\Sigma \beta_T}.$$

Здесь β_T — теоретическое значение коэффициента расходного комплекса, рассчитанное по программе “Терра-Гидро” с использованием в качестве исходных данных результатов эксперимента; p_k — текущее значение давления в камере сгорания; $F_{кр}$ — площадь критического сечения сопла; \dot{m}_Σ — суммарный расход рабочего тела в камере сгорания в текущий момент времени; μ_c — коэффициент расхода сопла.

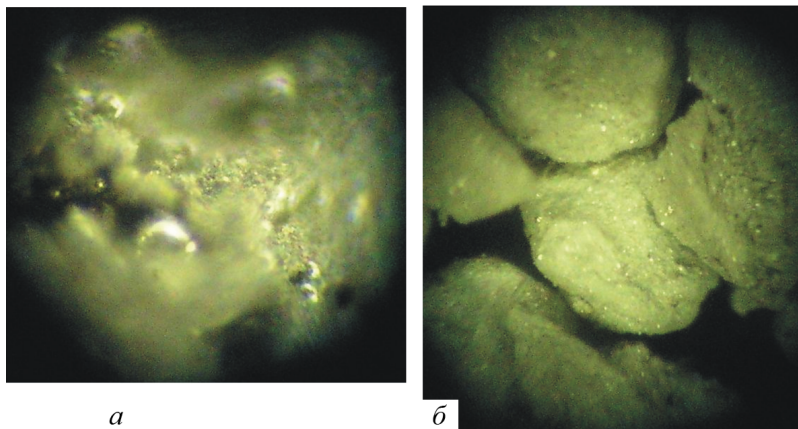


Рис. 1. Фотографии гранул-конгломератов частиц; сторона квадрата составляет 500 мкм (а) и 1000 мкм (б)

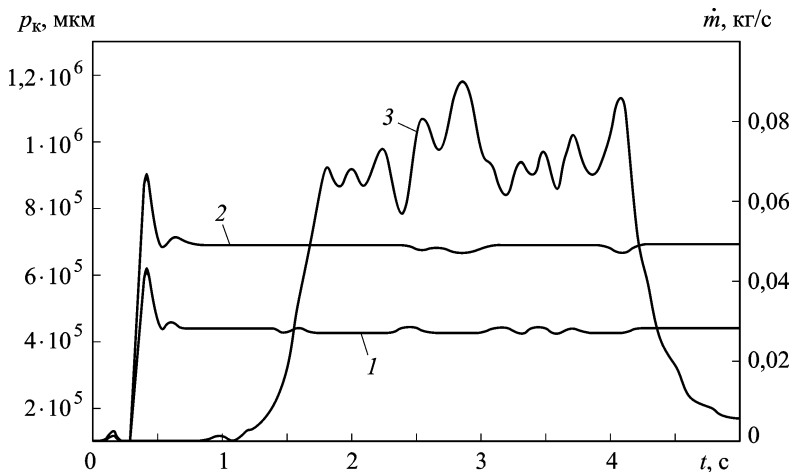


Рис. 2. Осциллограмма пуска:

1, 2 — расход воды в первой и второй зонах камеры сгорания; 3 — давление в камере сгорания

Результаты сравнительной оценки степени эффективности рабочего процесса в камере сгорания по средним значениям p_k и $K_{m\Sigma}$ представлены на рис. 3. Видно, что максимальное значение коэффициента расходного комплекса достигается при использовании состава с НДА (С-нм), которое превышает на $\sim 10 \dots 15\%$ соответствующие характеристики для состава на основе алюминия микронного размера (С-мкм).

Установлено также (рис. 4), что использование НДА в составе ЭКС приводит к уменьшению времени задержки воспламенения заряда τ_3 , поскольку частицы ультра- и нанодispersного размера имеют значительно меньшее характерное время периода индукции воспламенения.

Таким образом, в результате проведенных испытаний модельной камеры сгорания с зарядами ЭКС на основе ультра- и нанодispersного алюминия выявлено:

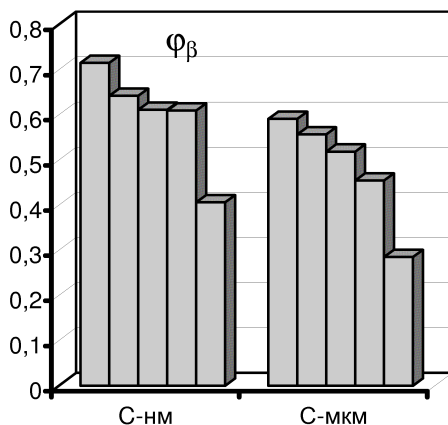


Рис. 3. Сравнительная оценка эффективностей рабочих процессов

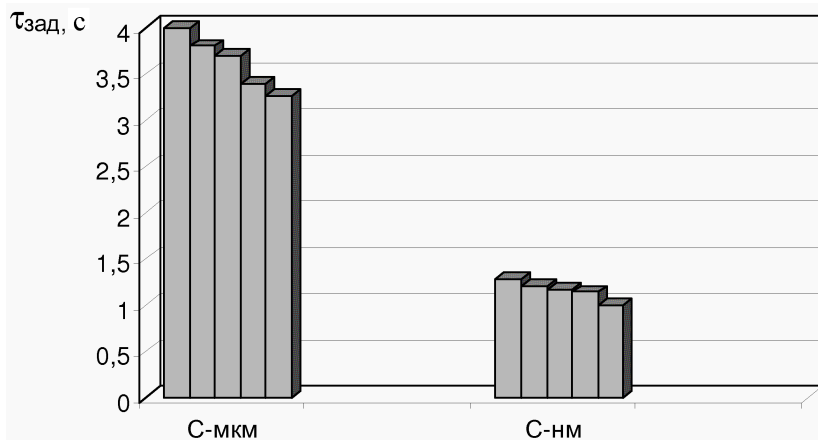


Рис. 4. Влияние дисперсности порошкообразного алюминия в ЭКС на время задержки воспламенения

— снижение примерно в 3 раза времени задержки воспламенения ЭКС на основе НДА по сравнению ЭКС на основе МДА;

— улучшение качества организации рабочего процесса для составов на основе ультра- и нанодисперсного алюминия, что приводит к возрастанию коэффициента расходного комплекса при прочих равных условиях, в частности наибольшее значение φ_{β} составляет 0,74.

Работа выполнена в рамках ведущей научной школы России, проект НШ-3215.2008.08.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение ультра- и нанодисперсных компонентов в пиротехнических системах / Н.М. Вареных, В.Н. Емельянова, С.Н. Ваганова и др. // Энергетические конденсированные системы. Материалы III Всерос. конф. – М., 2006. – С. 25–26.
2. Павловец Г. Я., Мелешко В. Ю., Шишов Н. И., Атаманюк В. М. Особенности горения энергетических конденсированных систем, содержащих нанодисперсные металлические горючие // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: Сб. материалов IV междунар. шк.-сем. – С.-Пб., 2004. – Т. 1. – С. 70–73.
3. Фролов Ю. В., Пивкина А. Н., Иванов Д. А., Павловец Г. Я. Наноалюминий, полученный методом электродуговой плазменной переоконденсации: структура частиц и параметры горения // Горение и взрыв. Материалы XIII Междунар. симп. – Черногловка, 2005. – С. 21.
4. Экспериментальная установка для определения характеристик горения гидрореагирующих топлив / А.Н. Бобров, А.В. Игнатов, В.И. Новиков и др. // Современные проблемы пиротехники: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. – Сергиев Посад, 2007. – С. 170–172.

Статья поступила в редакцию 1.06.2011



Дмитрий Алексеевич Ягодников родился в 1961 г., д-р техн. наук, зав. кафедрой “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области экспериментально-теоретического исследования процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов и бесконтактной диагностики ракетных двигателей.

D.A. Yagodnikov (b. 1961) – D. Sc. (Eng.), head of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 140 publications in the field of experimental and theoretical study of processes of ignition and combustion of powder-like metals and contactless diagnostics of rocket engines.



Андрей Владиславович Игнатов родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области экспериментального исследования ракетных двигателей, горения нанодисперсного горючего в пиротехнических составах.

A.V. Ignatov (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Researcher of the Power Engineering research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of experimental study of rocket engines, combustion of nanodispersed fuel in pyrotechnic compositions.