

Д. А. Ягодников, А. В. Воронцовский,  
Д. Ю. Девятуха, Е. И. Гусаченко,  
В. И. Сарабьев

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНО- И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ДИБОРИДА АЛЮМИНИЯ В ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВАХ

*Проведены испытания твердых пиротехнических топлив на основе диборида алюминия микронного и нанодиапазонов. Показано, что при переходе к использованию составов с добавками частиц металла дисперсностью порядка 270 нм полнота сгорания топлива возрастает на 10...20%. Выполнен рентгенофазовый анализ конденсированных продуктов сгорания. Установлено, что в к-фазе присутствуют  $\alpha$ -модификация  $Al_2O_3$  и фаза  $k*Al_2O_3 + B_2O_3$ .*

**Ключевые слова:** твердые топлива, горение, продукты сгорания, конденсированная фаза, диборид алюминия.

Актуальным направлением совершенствования энергобаллистических характеристик твердых пиротехнических топлив (ТПТ) является использование ультра- и нанодисперсных компонентов, позволяющих повысить полноту сгорания и снизить дисперсность конденсированных продуктов сгорания. В России и за рубежом ведутся интенсивные научно-исследовательские работы, посвященные использованию ультра- и нанодисперсных порошков алюминия и его боридов в составе ТПТ.

В работе [1] исследованы характеристики горения нанодисперсного порошкообразного алюминия (НПА). Показано, что такие порошки устойчиво горят в среде азота и его смесях с кислородом при комнатной температуре и атмосферном давлении. Порошок алюминия АСД-4 ( $r_{43} = 10$  мкм) воспламенить в азоте не удалось, тогда как смесь АСД-4 и НПА (от 10 % (масс.)) устойчиво горит в азоте при нормальных условиях.

В работах [2, 3] исследовано влияние размера частиц алюминия, а также его массового содержания на скорость горения топливной композиции. Авторы утверждают, что замена порошка алюминия со средним диаметром частиц 2 мкм на НПА дисперсностью 50 нм позволяет увеличить скорость горения в 10 раз, а также приводит к уменьшению массы агломератов и увеличению полноты сгорания топлива. Авторы предполагают, что последнее обстоятельство при использовании нанодисперсных порошков можно объяснить уменьшением массы агломератов, которые как раз и заключают в себе недогоревший алюминий.

Известно, что для летательных аппаратов, траектория движения которых лежит в пределах земной атмосферы, использование порошкообразного бора позволяет существенно повысить энергобаллистические характеристики топливных композиций. Сдерживающим фактором применения бора является его температура воспламенения (порядка 1900 К [4]). Однако для частиц нанодисперсного (200 нм) порошкообразного бора (НПБ) удалось реализовать устойчивое горение при начальной температуре 1600 К [5].

Использование порошка диборида алюминия в ТПТ позволяет понизить температуру воспламенения, а также сохранить энергетические характеристики ТПТ на приемлемом уровне.

Цель настоящей работы — исследование возможности повышения полноты сгорания ТПТ благодаря введению в его состав нано- и ультрадисперсного порошкообразного диборида алюминия (НПДБА).

Объекты исследования — это образцы ТПТ на основе диборида алюминия с различной дисперсностью. Топливная композиция ЭК-1 изготовлена с использованием порошка диборида алюминия со среднемассовым размером частиц  $d_{43} = 9$  мкм, в качестве связующего использован политетрафторэтилен (тефлон). В состав топливной композиции ЭК-2Т введен НПДБА с размером частиц  $d_{43} = 270$  нм, связующее — полисульфидный каучук. Модельный заряд представляет собой цилиндр диаметром 20 мм, забронированный по одному торцу и внешней поверхности [6].

Для проведения экспериментального исследования процессов горения ТПТ доработан экспериментальный стенд и разработана новая экспериментальная установка, в состав которой входят двухзонный газогенератор (ДГ) (рис. 1), предназначенный для исследования закономерностей горения ТПТ в условиях, реализуемых в СВРД, и система измерений.

Первая зона ДГ представляет собой газогенератор (ГГ) с сопловым блоком (промежуточное сопло), в котором находится заряд ТПТ; вторая зона — камеру сгорания (КС) с основным соплом.

Принимая во внимание габаритные размеры модельных зарядов, для предотвращения зашлаковки промежуточного сопла было принято

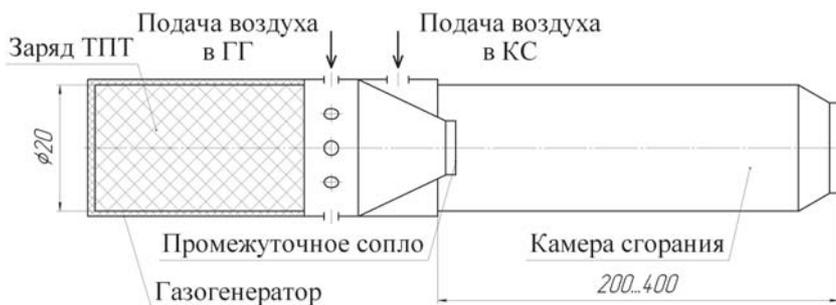


Рис. 1. Схема двухзонного газогенератора

решение организовать подвод воздуха в ГГ. Расчеты показали, что при коэффициенте избытка воздуха в ГГ  $\alpha_{ГГ} = 0,5$  для поддержания в нем давления на уровне 0,6 МПа диаметр промежуточного сопла должен составлять 4 мм, а для давления 1,2 МПа — 3 мм.

Двухзонный ГГ функционирует следующим образом. Перед срабатыванием штатного воспламенителя воздух через коллектор подается в ГГ, тем самым создается начальное давление  $p_{ГГ}$ . Воздух в КС поступает через кольцевую щель в зоне расположения промежуточного сопла. Продукты первичного горения ТПТ ускоряются в промежуточном сопле и со звуковой скоростью поступают в КС, где происходит догорание частиц металла. Далее продукты сгорания истекают в окружающую среду через основное сопло.

В зависимости от задачи эксперимента расход воздуха, подаваемого в ГГ, может меняться, что позволяет организовать режим горения ТПТ при  $\alpha_{ГГ} = 0,01 \dots 1$ . При соответствующем изменении расхода воздуха горение в КС может осуществляться при  $\alpha_{КС} = 1,2 \dots 6$ . Время пребывания продуктов сгорания в КС может варьироваться в диапазоне 0,2... 0,4 м за счет изменения длины камеры сгорания.

Основные режимные параметры ДГ могут быть заданы в следующих диапазонах:  $p_{ГГ} = 0,4 \dots 1,2$  МПа  $\alpha_{ГГ} = 0,01 \dots 1$ ;  $p_{КС} = 0,25 \dots 0,8$  МПа,  $\alpha_{КС} = 1,2 \dots 6$ .

Уровень давлений в ГГ и КС определяется значениями расходов воздуха и диаметрами промежуточного и основного сопел.

В связи с малыми габаритными размерами ГГ замер давления  $p_{ГГ}$  проводился на входе в коллектор воздуха. Давление в КС измерялось в нескольких точках по всему тракту камеры.

Для определения состава и температуры продуктов сгорания использовался спектрометр ИСП-51, на вход которого излучение от ПС передавалось с помощью световода, подсоединенного одним концом к окну в корпусе КС, а другим — к спектрометру.

Двухзонный ГГ был установлен на силоизмерительном столе. Для регистрации тяги использовался датчик усилий ПСВ-02.

Расходы воздуха в КС и в ГГ измерялись при помощи комплекта расходомерных сопел. Для визуализации процесса горения за срезом основного сопла была установлена видеокамера. При проведении видеозаписи использовались различные оптические фильтры.

На первой стадии экспериментальных исследований была поставлена задача воспламенения ТПТ при атмосферном давлении. Процесс горения заряда был зафиксирован с помощью видеокамеры.

Анализ видеозаписи показал, что время от подачи команды “Пуск” до начала воспламенения топлива ЭК-1 составляет 170 мс, для топлива ЭК-2Т задержка воспламенения составила 110 мс. Кроме того, можно заключить, что масса навески воспламенителя (составляющая 1 г) и

время ее горения оказались достаточными для воспламенения ТПТ. Осмотр зарядов после эксперимента показал, что топливо выгорело полностью, причем бронирующий стакан сохранился без изменения формы. Конденсированные продукты сгорания были собраны для последующего дисперсионного и химического анализов.

После подтверждения надежного воспламенения ПС штатным воспламенительным устройством были проведены огневые стендовые испытания (ОСИ).

Для оценки эффективности рабочего процесса в КС использовался коэффициент расходного комплекса

$$\varphi_{\beta} = \frac{\beta_{\text{экс}}}{\beta_{\text{теор}}},$$

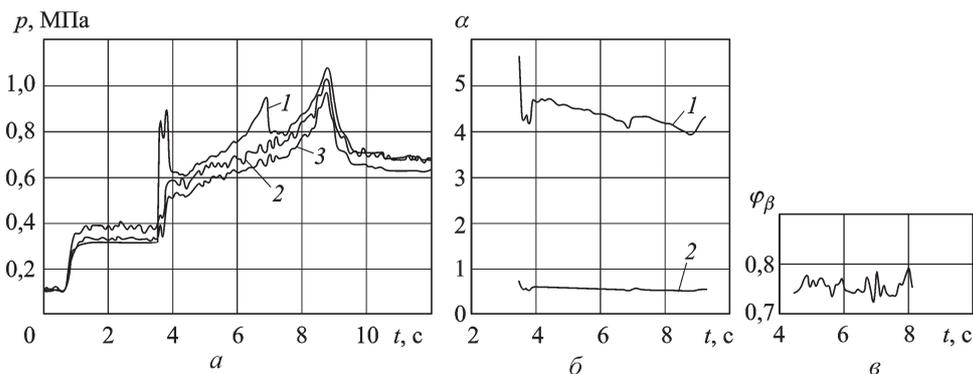
где  $\beta_{\text{экс}}$  и  $\beta_{\text{теор}}$  — значения расходного комплекса, полученные на основе экспериментальных данных и теоретическим путем с помощью программного комплекса “Терра”.

Экспериментальное значение расходного комплекса КС определялось по зависимости

$$\beta_{\text{экс}} = \frac{p_{\text{КС}} F_{\text{кр}}}{\dot{m}_{\Sigma}},$$

где  $p_{\text{КС}}$  — давление в КС;  $F_{\text{кр}}$  — площадь критического сечения основного сопла;  $\dot{m}_{\Sigma}$  — общий расход компонентов, определяемый суммированием массового расхода воздуха, подаваемого в ГГ и в КС ( $\dot{m}_{\text{В}_\text{КС}} + \dot{m}_{\text{В}_\text{ГГ}}$ ), и массового расхода продуктов сгорания ТПТ  $\dot{m}_{\text{T}}$ . Значение  $\dot{m}_{\text{T}}$  определялось по площади поверхности горения заряда  $F_{\text{T}}$ , плотности  $\rho_{\text{T}}$  и известному степенному закону горения ТПТ.

На рис. 2 приведена характерная осциллограмма пуска — изменение давления  $p_{\text{ГГ}}$  и  $p_{\text{КС}}$ , коэффициентов избытка воздуха  $\alpha$  и расход-



**Рис. 2. Осциллограмма пуска:**

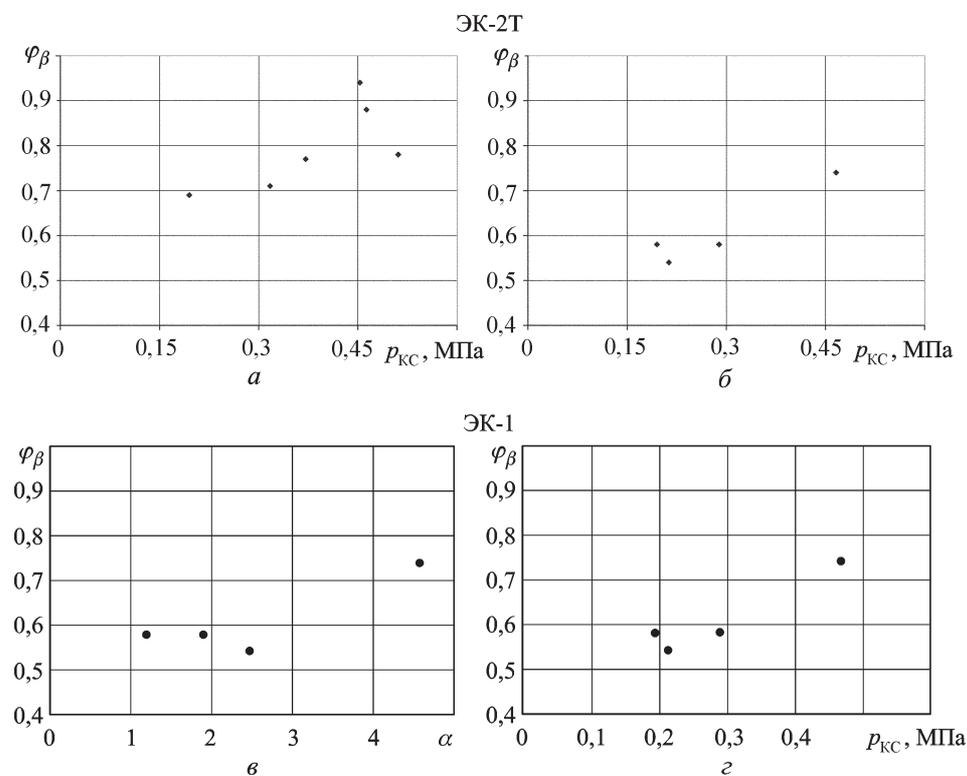
*a* — изменение давления (1 —  $p_{\text{ГГ}}$ ; 2 —  $p_{\text{КС1}}$  (замеренное на входе в КС); 3 —  $p_{\text{КС2}}$  (замеренное на входе в ОС)); *б* — изменение коэффициента избытка воздуха (1 —  $\alpha_{\text{КС}}$ ; 2 —  $\alpha_{\text{ГГ}}$ ); *в* — изменение коэффициента расходного комплекса

ного комплекса  $\varphi_{\beta}$  в зависимости от времени в период стабильного горения.

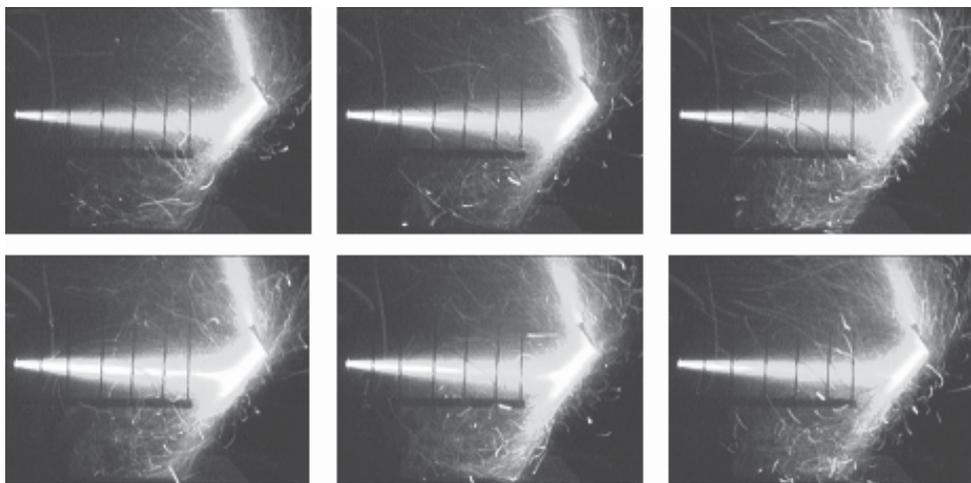
Рассмотрим зависимости изменения давления в ГГ и КС от времени (рис. 2, а). В соответствии с циклограммой эксперимента, при  $t = 0,5$  с воздух начинает поступать в ГГ и КС, что приводит к росту давления до определенного значения (в зависимости от расхода воздуха для каждого пуска). При  $t = 3,5$  с происходит подрыв воспламенителя. Начальный заброс давления продолжительностью 0,5... 1 с является следствием горения переходного слоя. При горении ТПТ наблюдается постоянный рост давления из-за зашлаковки проходных сечений КС и основного сопла. После прекращения горения ТПТ происходит спад давления, однако, давление не уменьшается до начального уровня. Это можно объяснить тем, что догорают осевшие на стенки КС частицы к-фазы с недогоревшим активным алюминием и горит бронировка ТПТ в ГГ.

На рис. 3 приведены некоторые результаты ОСИ. Из рисунка видно, что  $\varphi_{\beta}$  для топлива ЭК-2Т на 5... 20 % выше, чем для топлива ЭК-1.

Увеличение длины КС с 200 до 400 мм (топливо ЭК-1) привело к росту  $\varphi_{\beta}$  на 5%; для топлива ЭК-2Т — к увеличению  $\varphi_{\beta}$  на 15... 20%.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента расходного комплекса от коэффициента избытка воздуха (а, в) и давления (б, з) в КС для топливных композиций ЭК-2Т (а, б) и ЭК-1 (в, з) соответственно**



**Рис. 4.** Кадры видеозаписи пуска

Это можно объяснить увеличением времени пребывания частиц активного металла в КС.

Повышение давления в ГГ приводит к росту эффективности рабочего процесса, однако в некоторых экспериментах при давлении 2,5 МПа и более наблюдалось заметное ухудшение выноса конденсированной фазы в КС.

На рис. 4 приведена выборка из покадровых оцифровок изображений истечения продуктов сгорания ТПТ из КС ДГ в процессе проведения ОСИ. Изображения свидетельствуют о наличии пульсаций факела ПС, обусловленных соответствующими пульсациями давления в КС.

После эксперимента проводился отбор к-фазы для дальнейшего рентгенофазового анализа.

Рентгенофазовый анализ был выполнен на установке АДП2-01 с медным анодом в диапазоне углов  $2\theta$  от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $0,05^\circ$ . Апертура датчика составляла  $0,05^\circ$ , время накопления импульсов — 2 с. Для надежности по регламенту ежедневно проводится калибровка установки с эталонным порошком, после чего в расчет вводится соответствующая поправка. Идентификация материала на основе межплоскостных расстояний выполнена с использованием электронной картотеки индивидуальных веществ.

Образец для анализа получен из трех фракций в соответствующем массовом отношении. В работе использован образец массой  $\sim 200$  мг, предварительно измельченный в агатовой ступке. Обработка дифрактограмм оказалась очень сложной из-за большого числа разных фаз. Это связано с большой скоростью закаливания конденсированных продуктов и отклонением их фазового состава от состава тех же веществ, получаемых в статических температурных режимах.

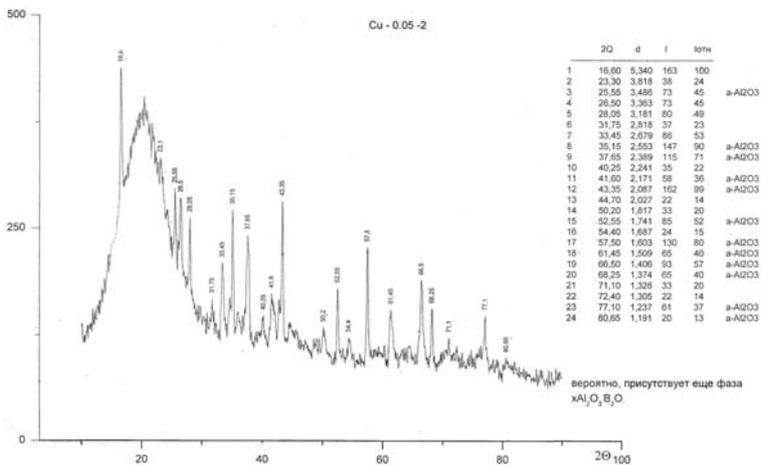


Рис. 5. Рентгенограмма образца ЭК-1

На рис. 5 приведена рентгенограмма образца к-фазы топлива ЭК-1, на которой хорошо видно много линий альфа-оксида алюминия. Остальные относятся к фазам состава  $k \cdot Al_2O_3 + B_2O_3$ .

Данные, полученные в ходе ОСИ, позволяют сделать вывод о том, что возможна реализация устойчивого горения ТПТ с добавками нанодисперсного порошка диборида алюминия с полнотой сгорания топлива порядка 70... 93 % в условиях КС ДГ. При этом полнота сгорания топлива, содержащего нанодисперсный порошок диборида алюминия, на 5... 20% выше, чем для ТПТ на основе порошка со среднемассовым размером частиц порядка 9 мкм.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта “Ведущие научные школы России”, проект НШ-3215.2008.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glotov O. G., Zarko V. E., Beckstead M. W. Agglomerate and oxide particles generated in combustion of Alex containing solid propellants // Energetic materials. Analysis, diagnostics and testing // 31th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2000. – P. 130-1 – 130-14.
2. Dokhan A., Price E. W., Sigman R. K. and Seitzman J. M. The Effects of Al Particle Size on the Burning rate and Residual oxide in aluminum propellant. AIAA, 2001. – 3581 p.
3. Окислители гетерогенных пиротехнических систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Н.И. Зарипов и др. – М.: Машиностроение, 1978.
4. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. Горение металлизированных конденсированных систем. – М.: ИХФ РАН СССР, 1962.
5. Gregory Young, Kyle Sullivan, Michael R. Zachariah, Kenneth Yu. Combustion characteristics of boron nanoparticles. Combustion and flame 156 (2009) – P. 322–333.
6. Применение ультра- и нанодисперсных компонентов в пиротехнических системах / Н.М. Вареных, В.Н. Емельянов, В.И. Сарабьев и др. // Энергетические конденсированные системы: Материалы III Всерос. конф. – Черноголовка, 2006. – С. 25–26.

Статья поступила в редакцию 26.11.2008

Дмитрий Алексеевич Ягодников родился в 1961 г. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. аумана. Автор более 130 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований 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 130 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 Владимирович Воронцов родился в 1946 г. Д-р техн. наук, заслуженный деятель науки России, заведующий отделом НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области горения порошкообразных металлов и газодинамики двухфазных потоков.

A.V. Voronetski (b. 1946) — D. Sc. (Eng.), Honored Worker of Science in Russia, head of department of the Research Institute for Power Engineering of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of combustion of powder-like metals and gas-dynamical two-phase flows.

Денис Юрьевич Девятуха родился в 1984 г. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области исследованию характеристик воспламенения и горения пиротехнических составов.

D.Yu. Devyatukha (b. 1984) — Post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of study of characteristics of ignition and combustion of pyrotechnical compositions.

Виктор Иванович Сарабьев родился в 1937 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом ФГУП ФНПЦ “НИИ прикладной химии”. Специалист в области экспериментальной отработки пиротехнических составов и создания энергетических установок.

V.I. Sarabiev (b. 1937) — D. Sc. (Eng.), professor, head of department of Federal State Unitary Enterprise “FNPTs “НИИ прикладной химии”. Specializes in the field of development of pyrotechnical compositions and creation of power engineering facilities.

Евгений Иванович Гусаченко родился в 1945 г. Канд. физ.-мат. наук. Автор более 40 научных работ в области экспериментального исследования процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов.

Ye.I. Gusachenko (b. 1945) — Ph. D. (Phys.-Math.). Author of more than 40 publications in the field of experimental and theoretical study of processes of ignition and combustion of powder-like metals.