

Памяти профессора А. Н. Золотко посвящается

УДК 536.46

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ ДИБОРИДА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ В ДВУХЗОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Д. А. Ягодников¹, А. В. Воронцовский¹, В. И. Сарабьев²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва, daj@bmstu.ru

²ФНПЦ НИИ прикладной химии, 141313 Сергиев Посад

Проведены экспериментальные исследования процессов воспламенения и горения микро- и наночастиц диборида алюминия в составе пиротехнических энергонасыщенных композиций в газогенераторе с воздушной камерой дожигания и термодинамические расчеты характеристик горения пиротехнических составов на основе диборида алюминия в воздухе. Выполнена видеосъемка процесса истечения продуктов сгорания из камеры дожигания. Показано, что при замене в пиротехническом составе частиц микронного диборида алюминия порошкообразным диборидом со средемассовым диаметром частиц ≈ 270 нм, а также при увеличении давления в камере дожигания полнота сгорания состава в воздухе возрастает на $5 \div 20$ %.

Ключевые слова: горение, наноразмерный диборид алюминия, пиротехнический состав, воздух, двухзонный рабочий участок, полнота сгорания.

DOI 10.15372/FGV20160307

ВВЕДЕНИЕ

Можно считать, что к настоящему времени сформирована база данных по макрокинетическим характеристикам воспламенения и горения одиночных частиц порошкообразного бора и их совокупности в окислительных средах различного химического состава. Основные результаты исследований, выполненных в течение 1960–2000 гг., нашли отражение в ряде монографий, среди которых следует особо отметить [1–5].

С учетом требований, предъявляемых к горючим и пиротехническим составам (ПС) энергосиловых установок, и на основе имеющихся экспериментальных данных по характерному времени преобразования бора в продукты сгорания можно сделать заключение: при использовании порошкообразного бора в качестве основного горючего или в качестве добавок, вводимых в состав ПС, пока не удастся организовать эффективный рабочий процесс в камере сгорания энергосиловых устано-

вок допустимых габаритно-массовых размеров. При этом основными сдерживающими факторами применения бора являются высокая температура воспламенения (≈ 1900 К) и большие значения характерного времени горения [3].

В связи с этим были начаты поисковые исследования по обоснованию возможности замены бора его соединениями с алюминием (диборид алюминия AlB_2) и магнием (полиборид магния MgB_{12}). На начальном этапе работ основной задачей являлась отработка оптимальной технологии получения боридов указанных металлов, например, в процессе спекания или сплавления порошков алюминия и бора в вакууме или восстановительной среде, а также при взаимодействии летучих соединений алюминия с бором или борсодержащим расплавом [6–8]. Однако исследование процессов воспламенения и горения отдельных частиц боридов в окислительной среде сложного химического состава (кислород, водяной пар, диоксид углерода) практически не проводилось. Число таких публикаций ограничено [9, 10]. Здесь особо отметим исследования Одесской научной школы горения профессора А. Н. Золотко, чьей

светлой памяти посвящена данная работа. Очевидно, что для создания реальных камер сгорания энергосиловых установок и организации эффективного рабочего процесса с учетом массово-габаритных ограничений необходимо располагать базой данных по времени преобразования не только одиночных частиц порошкообразных боридов, в частности диборида алюминия, но и их совокупности в условиях, моделирующих натурные.

Кроме того, для снижения периода индукции воспламенения, повышения полноты сгорания и уменьшения дисперсности конденсированных продуктов сгорания перспективным представляется введение в ПС порошкообразных высокоэнергетических компонентов в ультра- и нанодисперсном виде. В России и за рубежом ведутся интенсивные исследования по использованию ультра- и наноразмерных порошков алюминия, бора и их сплавов в составе различных энергетических конденсированных систем, результаты которых можно найти в монографиях и обзорах [11–14]. В частности, в работе [14] приведены экспериментальные данные, свидетельствующие, что для частиц нанодисперсного (≈ 200 нм) порошкообразного бора удалось реализовать устойчивое горение при начальной температуре 1600 К.

При использовании ультра- и нанодисперсных компонентов изменяются, кроме макрокинетических, также и внутрибаллистические характеристики ПС. Например, в работах [15, 16] исследовано влияние размера частиц алюминия, а также его массового содержания на скорость горения топливной композиции. Утверждается, что замена порошка алюминия со среднемассовым диаметром частиц 2 мкм порошком с размером частиц 50 нм позволяет увеличить скорость горения в 10 раз, а также приводит к уменьшению массы агломератов и увеличению полноты сгорания топлива. Авторы предполагают, что увеличение полноты сгорания топлива при использовании наноразмерных порошков объясняется уменьшением массы агломератов, которые как раз и заключают в себе недогоревший алюминий.

Цель данной работы — определение характеристик горения и исследование возможностей повышения полноты сгорания высокометаллизированных пиротехнических составов за счет использования нанодисперсного порошкообразного диборида алюминия.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

Исследовались цилиндрические образцы ПС на основе перхлората калия в качестве окислителя и порошков диборида алюминия нанометрового (состав ДБ-нм) или микрометрового (состав ДБ-мкм) размеров, в качестве связующего использовался политетрафторэтилен (массовое соотношение между ингредиентами в двух составах одинаковое). Образцы диаметром 20 мм и высотой ≈ 30 мм, бронированные по наружной цилиндрической поверхности и одному из торцов, изготавливались по технологии, разработанной в НИИ прикладной химии [17]. Некоторые характеристики исследуемых ПС приведены в табл. 1.

В топливной композиции ДБ-мкм использовался порошок диборида алюминия со среднемассовым размером частиц $d_{43} = 9.0$ мкм. Результаты кондуктометрического дисперсного анализа частиц исходного порошкообразного диборида алюминия, выполненного в Институте проблем химической физики РАН, представлены на рис. 1 в виде интегральных F и диф-

Таблица 1
Характеристики пиротехнических составов

Состав	d_{43}	Закон горения, мм/с
ДБ-мкм	9 мкм	$3.16 p_r^{0.53}$
ДБ-нм	270 нм	$2.62 p_r^{0.57}$

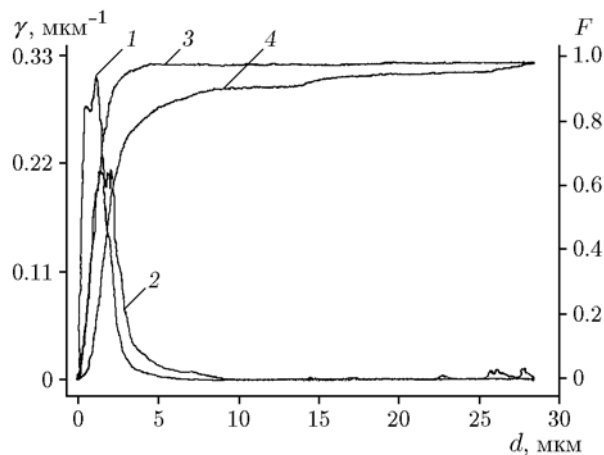


Рис. 1. Дисперсные характеристики порошкообразного диборида алюминия:

1, 2 — дифференциальное γ распределение количества и объема по диаметру; 3, 4 — соответствующее интегральное F распределение

ференциальных γ распределений количества и объема частиц по диаметру d .

Технология получения порошкообразного диборида алюминия основана на измельчении исходного продукта до нужной дисперсности в шаровой мельнице. Данный метод не позволяет получать частицы сферической формы с гладкой поверхностью. Поэтому, обладая неправильной формой, частицы слипаются, и вполне вероятно, что зарегистрированные при измерениях крупные объекты соответствуют не одиночным частицам, а их конгломератам. Примечательным является также несоответствие вида полученных зависимостей (рис. 1) ни с нормальным, ни с логарифмически-нормальным распределением.

Кроме того, по сравнению с порошкообразным алюминием, например марок АСД, получаемым методом распыления из расплава, для порошкообразного диборида алюминия характерна более высокая порозность ε насыпного слоя (табл. 2), что обусловлено значительным аутогезионным взаимодействием между частицами последнего.

Среднечисленный d_{10} и среднемассовый d_{43} размеры частиц микронного порошка диборида алюминия в сравнении с аналогичными параметрами порошкообразного алюминия марок АСД-1, АСД-4 и бора БСД-УПЗЭ [4] приведены в табл. 2.

Пиротехнический состав ДБ-нм содержит частицы размером $d_{43} = 270$ нм. Из нанодисперсных порошков диборида алюминия, полученных методом электродуговой плазменной перекомденсации в ГНИИХТЭОС [18], были изготовлены гранулы путем их смешения с раствором полимера, которые затем вводились в смесевую композицию.

Таблица 2
Порозность, среднечисленный и среднемассовый диаметры порошкообразных горючих

Горючее	ε	d_{10} , мкм	d_{43} , мкм
АСД-1	0.36	10.4	21.9
АСД-4	0.44	4.3	10.1
АВ ₂	0.59	4.5	9.0
БСД-УПЗЭ	0.49	4.9	10.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований процессов горения ПС разработана экспериментальная установка, в состав которой входят:

- пневмогидравлическая система (ПГС);
- двухзонный рабочий участок;
- система измерений.

Пневмогидравлическая система (рис. 2) экспериментальной установки включает в себя магистрали подачи воздуха в газогенератор (ГГ) и камеру дожигания (КД). Воздух из объединенных в одну рампу баллонов подается под давлением 15 МПа, и с помощью редуктора давление понижается до 11 МПа. В экспериментальную установку воздух подается при открытии вентиля В1. Во входной магистрали давление контролируется манометром М1. Расход воздуха в ГГ определяется давлением за редуктором Р1 и контролируется посредством

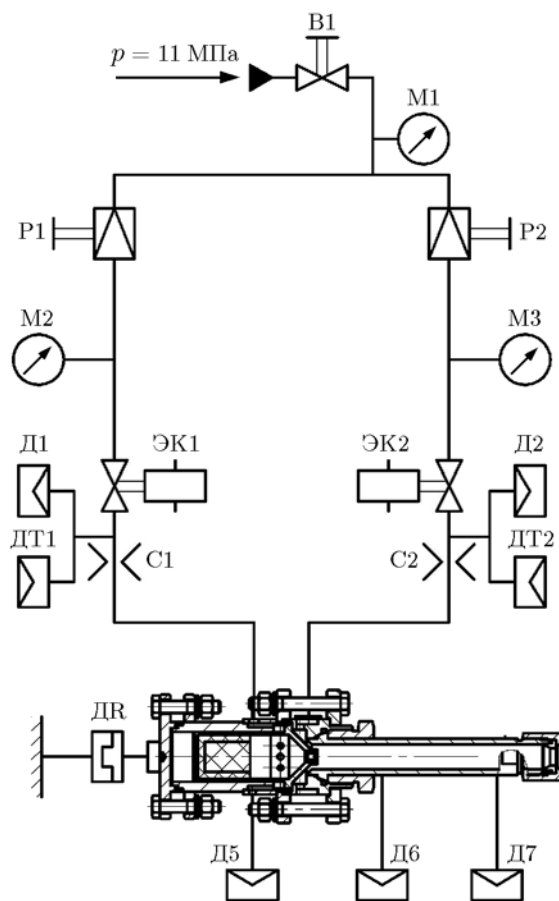


Рис. 2. Пневмогидравлическая система экспериментальной установки

манометра М2, а расход воздуха в КД — редуктором Р2 и манометром М3 соответственно.

Расходомерный участок магистрали подвода воздуха в ГГ состоит из мерной шайбы С1 со сверхкритическим перепадом давления и из датчиков температуры ДТ1 и давления Д1. Расходомерный участок магистрали подвода воздуха в КД состоит из мерного сопла С2 и датчиков температуры ДТ2 и давления Д2. Создаваемая камерой дожига тяга регистрируется с помощью датчика усилия ДР. Сигналы с датчиков через усилитель поступают в регистрационный комплекс «Лотос». Система управления работает в автоматическом режиме в соответствии с циклограммой пуска, обеспечивая открытие и закрытие электроклапанов ЭК1 и ЭК2, установленных в магистралях подачи воздуха в ГГ и КД.

Экспериментальная установка позволяет менять основные режимные параметры в следующих диапазонах: давление в ГГ $p_r = 0.4 \div 1.2$ МПа, давление в КД $p_k = 0.25 \div 0.5$ МПа.

Первая зона рабочего участка (рис. 3) представляет собой газогенератор с сопловым блоком (промежуточное сопло). В ГГ размещается исследуемый ПС и подводится вспомогательный воздух. Вторая зона — КД с основным соплом, в которую подается большая часть воздуха.

Принимая во внимание габариты модельных образцов, для предотвращения зашлаковки промежуточного сопла было принято решение организовать подвод воздуха в ГГ. Расчеты показали, что при коэффициенте избытка воздуха в ГГ $\alpha_r = 0.5$ для поддержания в нем давления на уровне 0.6 МПа диаметр промежу-

точного сопла должен составлять 4 мм, а для давления 1.2 МПа — 3 мм.

Двухзонный рабочий участок функционирует следующим образом. Перед срабатыванием штатного воспламенителя в виде навески дымного пороха воздух через перфорированный коллектор, расположенный перед промежуточным соплом, подается в ГГ, тем самым создается начальное давление p_r . Продукты первичного горения ПС ускоряются в промежуточном сопле и со звуковой скоростью поступают во вторую зону, где происходит догорание частиц металла. Далее продукты сгорания истекают в окружающую среду, ускоряясь в основном сопле, выполненном без расширяющейся части.

В зависимости от задачи эксперимента расход воздуха, подаваемого в ГГ, может меняться, что позволяет организовать режим горения ПС при $\alpha_r = 0.01 \div 1$. При соответствующем изменении расхода воздуха во вторую зону горение в КД может осуществляться при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1.0 \div 6$. Причем время пребывания продуктов сгорания в ней может варьироваться за счет изменения длины КД в диапазоне $0.2 \div 0.4$ м.

В связи с малыми габаритами ГГ давление p_r оценивалось по результатам замера давления на входе в коллектор первой зоны (датчик давления Д5 типа МД). Давление в КД измерялось в двух сечениях датчиками Д6, Д7 типа МД.

Для визуализации процесса горения за срезом основного сопла размещалась видеокамера Panasonic-NVZ. При проведении видеозаписи на объектив видеокамеры устанавливали интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны 552 нм.

Для оценки и сравнения эффективности рабочего процесса в КД, которая непосредственно связана с полнотой сгорания топлива, использовался коэффициент расходного комплекса:

$$\varphi_\beta = \beta_\beta / \beta_T, \quad (1)$$

где β_β — величина расходного комплекса, полученная на основе экспериментальных данных, β_T — рассчитанная с помощью программного комплекса «Терра» [19]. На рис. 4 представлены зависимости β_T от коэффициента избытка окислителя α для композиций ДБ-мкм и ДБ-нм, которые практически совпадают. Имеющиеся отличия обусловлены изменением со-

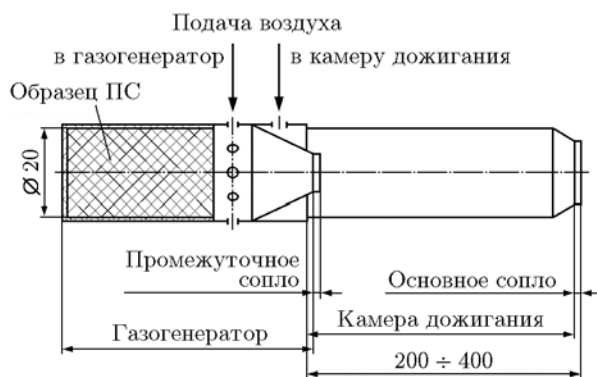


Рис. 3. Схема двухзонного рабочего участка (размеры указаны в миллиметрах)

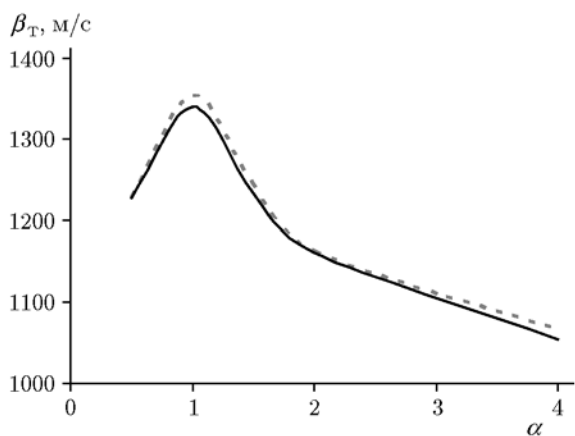


Рис. 4. Зависимость расходного комплекса от коэффициента избытка окислителя ($p = 0.4$ МПа):

сплошная линия — состав ДБ-мкм, штриховая — состав ДБ-нм

става, которое определяется наличием добавок, обеспечивающих возможность изготовления нанодисперсных частиц диборида алюминия и их ввод в ПС.

Экспериментальное значение расходного комплекса определялось по зависимости

$$\beta_{\Sigma} = \frac{p_k F_{кр}}{\dot{m}_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $F_{кр}$ — площадь критического сечения основного сопла, \dot{m}_{Σ} — суммарный расход компонентов в КД, определяемый сложением массовых расходов воздуха, подаваемого в ГГ и КД, и массового расхода продуктов сгорания ПС, определяемого по площади поверхности горения (торца) цилиндрического образца, его плотности и известному степенному закону горения ПС (см. табл. 1).

Используемая в работе система измерения позволяет определять режимные параметры с систематическими погрешностями, значения которых приведены в табл. 3. С учетом данных из табл. 3 погрешность опреде-

ления коэффициента расходного комплекса по формулам (1), (2), рассчитанная как погрешность косвенного измерения, составляет $\delta_{\varphi\beta} = \pm 0.93$ %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе работы исследовались особенности воспламенения и диспергирования ПС при атмосферном давлении. Процесс горения ПС и истечение продуктов сгорания с поверхности торца вертикально вверх регистрировались видеокамерой. На рис. 5 приведен один из кадров видеозаписи. Анализ видеоряда показал, что время от подачи команды «Пуск» до начала воспламенения заряда ДБ-мкм составляет 170 мс, для заряда ДБ-нм (270 нм) — 110 мс. Кроме того, можно заключить, что масса навески воспламенителя, равная 1 г, и время ее горения оказались достаточными для воспламенения обоих ПС. Осмотр зарядов после эксперимента показал, что топливо выгорело полностью, причем бронирующий стакан сохранился без изменения формы.

Для оценки высоты факела было изготовлено специальное приспособление, представляющее собой стальной стержень с приваренными к нему с шагом 50 мм прутками. Факел продуктов сгорания заряда ДБ-мкм имеет высоту порядка 150 мм (см. рис. 5) и характеризуется наличием отчетливых треков, обусловленных догоранием в воздухе крупных частиц.

После подтверждения надежного воспламенения ПС воспламенительным устройством и выноса продуктов сгорания из объема, огра-



Рис. 5. Факел истечения продуктов сгорания ПС на воздухе

Таблица 3

Предельные погрешности измерения давления воздуха, его расходов и суммарного расхода компонентов

Устройство	$\delta_p, \%$	$\delta \dot{m}_B, \%$	$\delta \dot{m}_{\Sigma}, \%$
Газогенератор	± 0.41	± 1.2	± 0.53
Камера дожигания	± 0.41	± 1.2	± 0.83

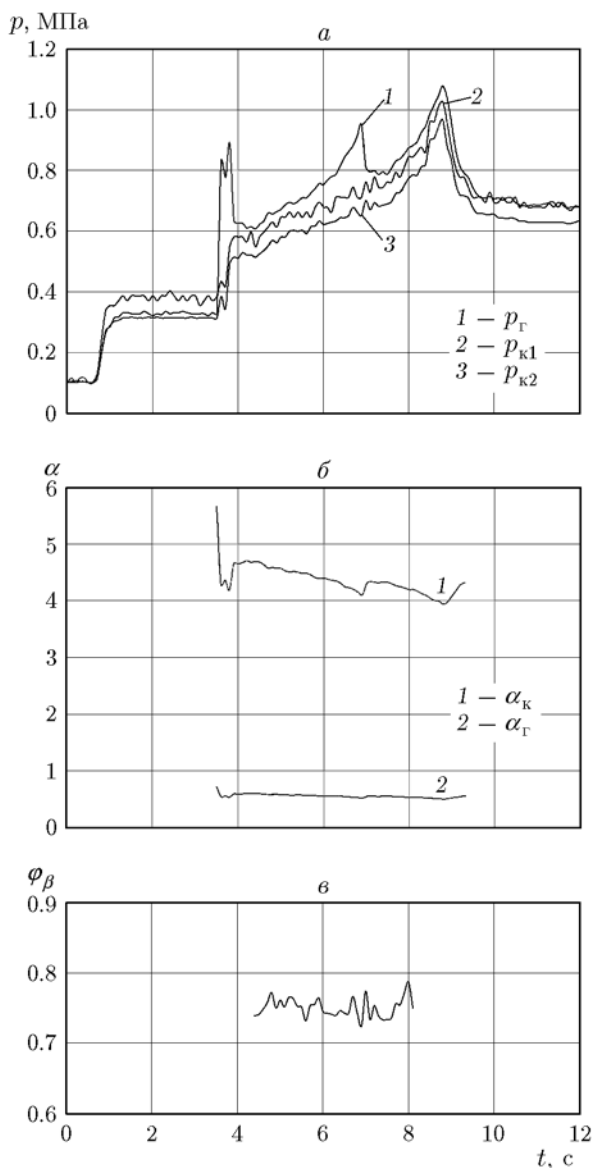


Рис. 6. Осциллограмма пуска (ДБ-мкм):
 а — давление, б — коэффициент избытка окислителя в камере дожигания (1) и газогенераторе (2), в — коэффициент расходного комплекса

ниченного бронировкой, были проведены огневые стендовые испытания совместной работы модельного ГГ и КД.

На рис. 6 представлена характерная осциллограмма пуска. Приведены зависимости давления в ГГ и КД, коэффициента избытка воздуха и коэффициента расходного комплекса от времени на участке стабильного горения ПС марки ДБ-мкм.

В соответствии с циклограммой эксперимента при $t = 0.5$ с воздух начинает посту-

пать в ГГ и КД, что приводит к росту давления до определенного значения (рис. 6, а). При $t = 3.5$ с происходит подрыв воспламенителя. Начальный заброс давления продолжительностью $0.5 \div 1$ с является следствием совместного горения воспламенительного и пиротехнического составов. При горении ПС наблюдается постоянный рост давления, что является следствием зашлаковки основного сопла. После прекращения горения ПС давление уменьшается, однако не до начального уровня. Это можно объяснить тем, что идет догорание осевших на стенки КД частиц конденсированной фазы с некоторым количеством активного алюминия, а также горение бронировки ПС в газогенераторе.

На рис. 7 представлены некоторые результаты вторичной обработки экспериментальных данных, которые позволяют сделать вывод о том, что значение φ_{β} для состава ДБ-нм на $5 \div 20$ % выше, чем для состава ДБ-мкм. Это можно объяснить тем, что бóльшая дисперсность диборида алюминия, применяемого в составе ДБ-нм, обуславливает меньшее время задержки воспламенения и горения, которое так же, как у одиночных частиц алюминия и бора, предположительно пропорционально d^n , где $n = 1.8 \div 2$. В свою очередь, это приводит к повышению их полноты сгорания и, соответ-

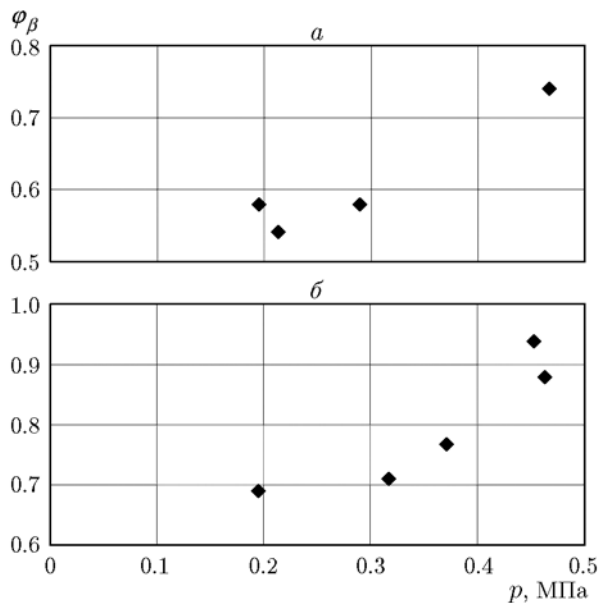


Рис. 7. Зависимость коэффициента расходного комплекса от давления в камере дожигания составов ДБ-мкм (а) и ДБ-нм (б)

ственно, значений φ_{β} на одинаковой длине КД.

Увеличение длины КД с 200 до 400 мм (состав ДБ-мкм) привело к росту коэффициента расходного комплекса φ_{β} на 5 %, а для состава ДБ-нм — на 15 ÷ 20 %, что можно объяснить большей полнотой сгорания наночастиц диборида алюминия в КД при прочих равных усло-

виях.

При повышении давления в КД эффективность рабочего процесса растет для обоих составов (см. рис. 7). Поскольку экспериментальные данные по влиянию давления на время горения одиночных частиц диборида алюминия отсутствуют, то, используя аналогию с горением частиц алюминия, для которых увеличение давления в исследуемом диапазоне приводит к снижению времени их горения [3, 4], можно заключить, что повышение давления в КД также приводит к увеличению скорости горения частиц диборида алюминия, что обуславливает повышение полноты сгорания и, соответственно, значений φ_{β} при прочих равных условиях.

На рис. 8 приведена выборка из покадровых оцифровок изображений истечения продуктов сгорания ПС из камеры дожигания. Изображения свидетельствуют о наличии пульсаций длины и интенсивности излучения факела, обусловленных соответствующими пульсациями давления и коэффициента избытка окислителя.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о возможности реализации устойчивого горения пиротехнического состава на основе нанодисперсного порошка диборида алюминия. При этом диспергирование в газогенераторе и полнота сгорания пиротехнического состава в камере дожигания достигают удовлетворительного уровня порядка 70 ÷ 90 %. Оцениваемая по коэффициенту расходного комплекса полнота сгорания состава, содержащего наноразмерный порошок диборида алюминия, оказалась на 5 ÷ 20 % выше, чем для состава на основе порошка со среднемассовым размером частиц порядка 9 мкм.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института проблем химической физики РАН за помощь в проведении дисперсного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Исследование** ракетных двигателей на твердом топливе: сб. ст. / под ред. М. Саммерфилда; пер. с англ. под ред. И. Н. Козловского. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
2. **Гетерогенное** горение: пер. с англ. / под ред. А. В. Ильинского. — М.: Мир, 1967.

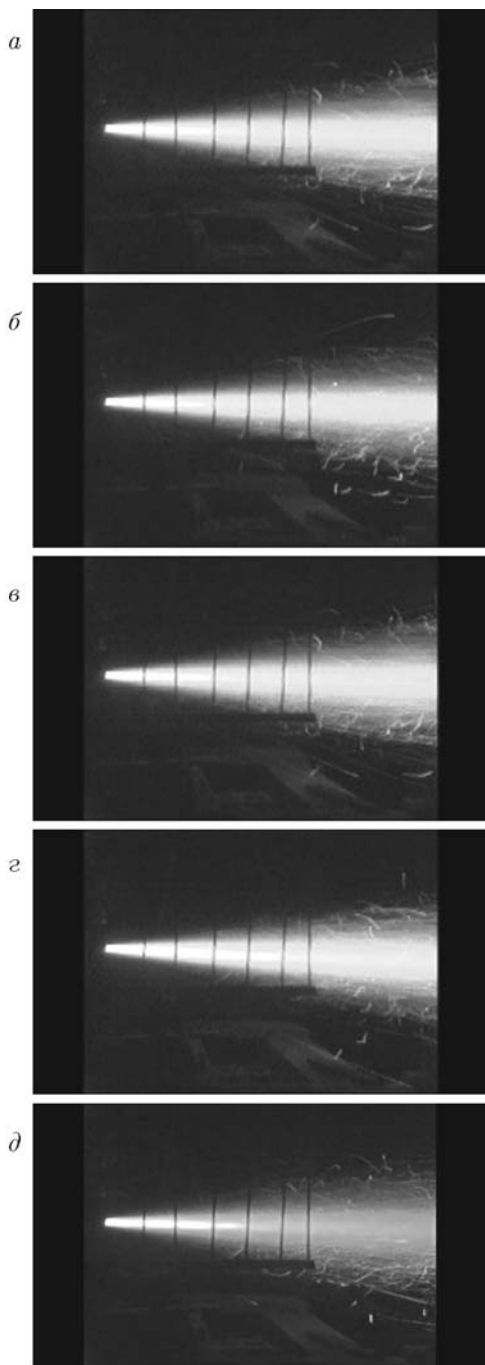


Рис. 8. Кадры видеозаписи испытания образца ДБ-мкм

3. **Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачаев В. С., Коротков А. И.** Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
4. **Ягодников Д. А.** Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
5. **Combustion of Boron-based Solid Propellants and Solid Fuels** / K. K. Kuo, R. Pein (Eds). — Boca Raton: CRC Press, 1993.
6. **Химический** энциклопедический словарь / под ред. И. Л. Кнунянца. — М.: Сов. энцикл., 1983.
7. **Елшина Л. А., Кудяков В. Я., Молчанова Н. Г.** Высокотемпературный синтез диборида алюминия из хлоридного расплава, содержащего B_4C // Расплавы. — 2007. — № 6. — С. 73–79.
8. **Розенбанд В., Гани А.** Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 34–39.
9. **Яковлева Т. А., Киро С. А., Киро А. Н. и др.** Горение частиц диборидов металлов (титана и алюминия) в пламени газовой горелки // Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газовая динамика: тез. докл. III Всесоюз. школы-семинара. — Томск, 1991. — Ч. 2. — С. 43–44.
10. **Ягодников Д. А., Воронежский А. В., Девятуха Д. Ю. и др.** Исследование процессов горения и рентгенофазовый анализ продуктов сгорания пиротехнических составов на основе нано- и ультрадисперсного диборида алюминия // Материалы XIV симпоз. по горению и взрыву. — Черноголовка, 2008. — С. 202.
11. **Горение нанопорошков металлов** / А. А. Громов, Т. А. Хабас, А. П. Ильин и др. — Томск: Дельтаплан, 2008.
12. **Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А. Б., Седой В. С., Бабук В. А.** Горение смесей твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 80–94.
13. **Бернер М. К., Зарко В. Е., Талавар М. Б.** Наночастицы энергетических материалов: способы получения и свойства (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 32, № 6. — С. 3–30.
14. **Young G., Sullivan K., Zachariah M. R., Yu K.** Combustion characteristics of boron nanoparticles // Combust. Flame. — 2009. — V. 156. — P. 322–333.
15. **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 Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2000. — P. 130-1–130-14.
16. **Dokhan A., Price E. W., Sigmant R. K., Seitzman J. M.** The effects of all particle size on the burning rate and residual oxide in aluminum propellant // AIAA Paper N 2001-3581. — 2001.
17. **Емельянов В. Н., Мелешко В. Ю., Сарабьев В. И. и др.** Пути повышения эффективности применения высокодисперсных компонентов в энергетических конденсированных системах // Современные проблемы технической химии: матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. — Казань, 2009. — С. 128–135.
18. **Пат. 2068400 РФ, МКИ² 7 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; Опубл. 28.10.1996; НКИ 78-706.
19. **Трусов Б. Г.** Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2012. — № 1. — С. 21. — DOI: 18698/2308-6033-2012-1-31.

*Поступила в редакцию 8/V 2015 г.,
в окончательном варианте — 25/XI 2015 г.*