

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ С ПОРОШКООБРАЗНЫМ ТИТАНОМ \*

Исследовано горение топлив, состоящих из металлического титана (15–29 %), нитрата аммония и энергетической матрицы при атмосферном давлении. Особенность рецептуры топлив – отсутствие перхлората аммония (ПХА). Определены скорости горения и характеристики конденсированных продуктов горения (КПП), в том числе массовые распределения частиц КПП во всем диапазоне размеров и детальные распределения в наноразмерном диапазоне с использованием оригинальных методик отбора. Обнаружена агломерация титана в волне горения, что приводит, в частности, к образованию шлаковых остатков даже при низком (15 %) содержании титана в топливе. Скорость горения возрастает при повышении содержания титана. При этом также возрастает масса шлаковых остатков и снижается полнота сгорания металла. Рентгенофазовый анализ показал, что частицы дыма представляют собой диоксид титана различных кристаллических форм (рутил, анатаз, брукит). Выход оксидного дыма составляет около 5 % от массы титана в топливе. Показано, что параметры дисперсности и структуры аэрозольных частиц оксидного дыма практически совпадают с таковыми для топлив на основе ПХА. Характерный размер первичных наночастиц оксидного дыма  $D_{10} = 23$  нм, фрактальная размерность агрегатов  $D_f = 1,55$ .

*Ключевые слова:* титан, бесхлорное топливо, нитрат аммония, скорость горения, агломерация, конденсированные продукты, наноразмерный диоксид титана.

### Введение

Предполагается, что нейтрализацию ядовитого облака можно осуществить посредством введения в него достаточного количества высокоактивных каталитических частиц.

Известно, что наночастицы  $TiO_2$  в кристаллической модификации анатаз демонстрируют превосходные фотокаталитические свойства, которые обеспечивают разрушение различных вредных веществ. Для создания (или рассеяния) наночастиц  $TiO_2$  привлекательны процессы горения и взрыва энергетических конденсированных систем, содержащих титан [1].

Целью работы было создание топлив, генерирующих при горении наноразмерные частицы  $TiO_2$ , и изучение их характеристик горения. Особый интерес представляют свойства продуктов горения, включая наноразмерные частицы. Заметим, что при-

менение многих традиционных компонентов твердых топлив и пиротехнических систем в данном случае ограничено. Например, перхлорат аммония при горении дает хлор, отравляющий фотокаталитическую активность частиц; другие окислители типа солей металлов дают нежелательные конденсированные продукты горения и т. д.

### Топлива и образцы

К рецептуре топлива предъявляли следующие требования:

1) топливо не должно содержать ПХА и традиционных окислителей типа солей металлов, а также других компонентов, дающих конденсированные продукты горения типа оксидов металла (кроме оксида титана);

2) топливо должно стабильно гореть при комнатной температуре и атмосферном давлении и образовывать индивидуальные горящие частицы титана, которые затем догорают

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МНТЦ в рамках проекта № 3305 «Синтез и исследование металлоксидных катализаторов фотохимического разложения вредных газов, возникающих в результате террористических актов и техногенных катастроф». Авторы выражают благодарность коллегам, участвовавшим в проведении и обработке экспериментов и в обсуждении результатов: В. Н. Симоненко, А. М. Бакланову, В. Е. Зарко, А. А. Онищуку, В. В. Карасеву, Н. А. Ивановой, В. Л. Бизяеву.

в окружающем воздухе, образуя дымообразный  $TiO_2$ ;

3) размер горящих частиц  $Ti$  должен быть мал, чтобы обеспечить высокую полноту сгорания металла;

4) количество дымообразного  $TiO_2$  (на единицу массы топлива) должно быть максимальным.

Разработку топлив проводили с использованием термодинамических расчетов, пробных экспериментов и на основе анализа литературных данных. Следует отметить, что большинство работ посвящено твердофазному горению титана в СВС-системах. Работы, в которых рассматривается горение газифицирующихся систем с титаном, очень немногочисленны [1–3]. Ограниченные данные о характеристиках оксидного дыма, образуемого при горении пиротехнических композиций с титаном и ПХА, имеются только в наших предшествующих работах [4; 5].

Составы изученных топлив представлены в табл. 1.

Топлива базируются на энергетической матрице, включающей связующее и наполнитель – нитросоединения. Размер частиц наполнителя меньше 20 мкм, так что матрицу можно считать гомогенной. Топлива не полимеризованы и имели консистенцию густой пасты. Образцы для сжигания представляли собой стаканчики, заполненные топливной массой заподлицо. Стаканчик образован отрезком трубки из пирекса и дном-пробкой из фторопласта (рис. 1). Внутренний диаметр трубки и глубина стаканчика – около 1 см, вес топлива – примерно 1,8 г.

Таблица 1

Составы топлив (% масс.)

№ топлива	Матрица	Ti *	HA **
0	100	0	0
1	46,0	15,1	38,9
2	46,0	15,7	38,3
3	42,0	26,1	31,9
4	42,0	29,0	29,0
5	53,8	20,8	25,4

\*  $Ti$  – порошкообразный титан с частицами неправильной формы размером 0–100 мкм, 88 % массы составляют частицы мельче 63 мкм.

\*\*  $HA$  – порошок нитрата аммония с частицами неправильной формы с размером 0–300 мкм, 70 % массы составляют частицы мельче 160 мкм.

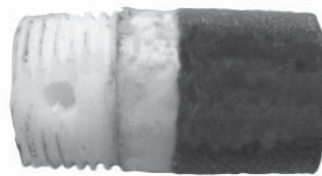


Рис. 1. Образец для сжигания: топливная масса в стаканчике

Указанные выше требования были в основном удовлетворены. Топлива легко воспламеняются от нихромовой проволоки, нагреваемой электрическим током, и устойчиво горят, выбрасывая горящие частицы титана. Наблюдаются характерные последовательные взрывы горящих частиц (рис. 2).

Оказалось, однако, что титан, подобно алюминию, агломерирует в волне горения, что накладывает ограничения на содержание титана в топливе. Большой размер горящих частиц-агломератов приводит к сравнительно низкой полноте сгорания металла и, как следствие, небольшому выходу оксидного дыма. Представленные в табл. 1 вариации рецептуры в случае топлив 1–3 имели целью оптимизацию состава для повышения выхода оксидного дыма; для топлив 0–3 проведены отборы всей массы конденсированных продуктов горения по специально разработанной методике. Топливо 0 использовали для определения массы продуктов горения матрицы. Вклад продуктов горения матрицы в общую массу КПГ учитывали при обработке данных для металлизированных топлив 1–3. Для топлив 4 и 5 определены характеристики оксидного аэрозоля в наноразмерном диапазоне с использованием методик, часть из которых описана в [4; 5].



Рис. 2. Факел горения топлива 3. Горизонтальная полоска в нижней части изображения – срез стаканчика диаметром 1 см

## Техника эксперимента и результаты

### Массовые распределения КПП и выход оксидного дыма

Изучение КПП проводили при атмосферном давлении посредством сбора частиц с последующими анализами их гранулометрического состава и морфологии.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 3.

Образец зажигался нихромовой проволокой и горел факелом вниз внутри цилиндрической камеры, продуваемой воздухом с расходом  $300 \text{ см}^3/\text{с}$ . Воздух входит в камеру сверху и выходит снизу, проходя через пакет ситовых сеток и аналитический аэрозольный фильтр типа АФА, улавливающие частицы КПП. На внутренних стенках камеры установлены 4 секции футеровки, которые взвешивали до и после опыта. Таким образом, на фильтрующих элементах и футеровке улавливается вся масса КПП. По записи сигнала фотодиода определяли время горения образца. Зная длину образца и время горения, рассчитывали скорость горения. Фактически установка

представляет собой модифицированную внутреннюю часть бомбы для отборов КПП [6].

После эксперимента ситовые сетки промывали ацетоном, затем суспензию частиц КПП в ацетоне делили на фракции путем мокрого просеивания через сита с ячейками 280, 160 и 80 мкм. Фракции высушивали и взвешивали.

Ниже описана морфология частиц КПП, которую оценивали визуально под микроскопом, и представлены результаты гранулометрического анализа. Оказалось, что при горении топлив в стаканчике остается шлак, представляющий собой спеченный частично окисленный металл, а также углеродистые остатки горения матрицы (рис. 4). Местами шлак оплавлен, и в нем видны сферические частицы. Многие частицы в шлаке покрыты желтой или оранжевой пленкой (предположительно, оксидной). В местах утончения пленки через нее просвечивает металл.

Фракция частиц крупнее 280 мкм состоит из сферических частиц и частиц неправильной формы, которые выглядят как фрагменты шлакового остатка на стенках стаканчика. Поэтому в массовом распределении ситовая

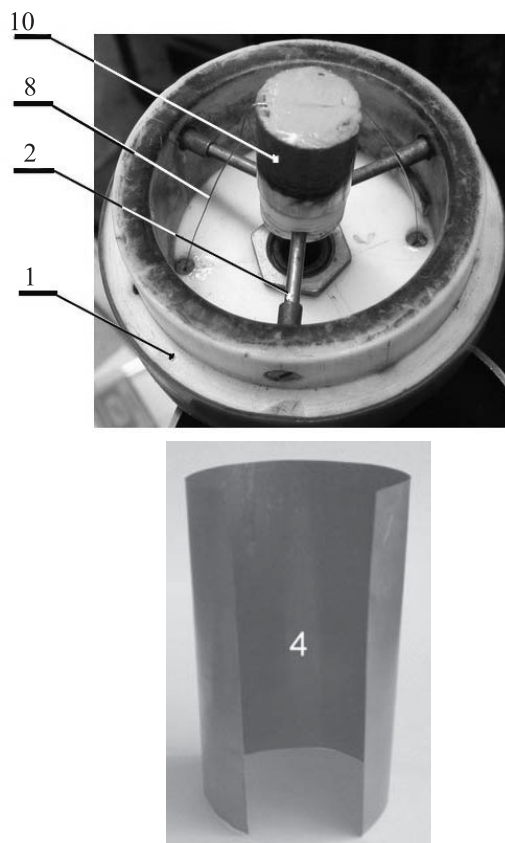
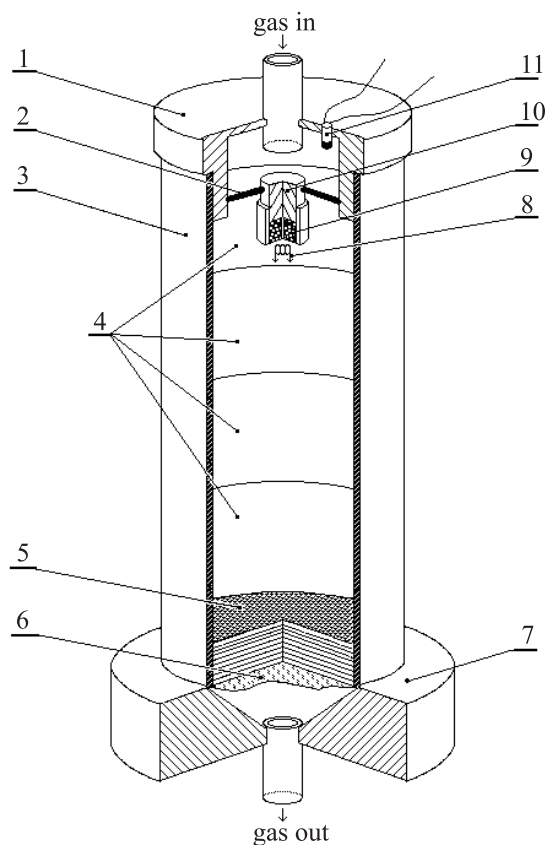


Рис. 3. Схема установки для отбора всей массы КПП: 1 – верхняя крышка камеры; 2 – одна из трех спиц; 3 – камера ( $\text{Ø}5 \times 40 \text{ см}$ ); 4 – съемная футеровка (4 секции); 5 – пакет ситовых сеток; 6 – аэрозольный фильтр; 7 – нижняя крышка камеры; 8 – проволока поджига; 9 – топливо; 10 – образец в сборке; 11 – фотодиод

фракция частиц крупнее 280 мкм и шлак в стаканчике объединены и рассматриваются как фракция 280–1 000 мкм. Правая граница этой фракции (1 000 мкм) условная.

Сферические частицы во фракции крупнее 280 мкм либо гладкие с металлическим блеском, либо шероховатые, либо покрыты желто-оранжевой пленкой. Шероховатые частицы зачастую полые и выглядят, как раздутая оболочка (сквозь имеющиеся отверстия видно, что внутри пусто).

Остальные фракции КПП (160–280, 80–160 и мельче 80 мкм) состоят в основном из сферических частиц металлического вида и цвета, а также частиц желтых, реже белого или золотистого цвета.

Все фракции КПП умеренно загрязнены продуктами горения матрицы – углеродистыми частицами, имеющими форму переплетенных волокон.

Частицы, уловленные на фильтре, и частицы ситовой фракции мельче 80 мкм исследовались на автоматическом гранулометре «Малверн-3600Е» (режим: диапазон 0,5–118 мкм, несущая жидкость – ацетон, ультразвуковая деконтация перед измерением, механическое перемешивание суспензии в процессе измерения). Базируясь на данных гранулометрического анализа и массового фракционного анализа, путем расчета [6] получали совокупные массовые распределения всех отобранных частиц КПП. Детальный гранулометрический анализ фракций 80–160, 160–280 и 280–1000 мкм не проводили, поэтому они представлены в совокупном массовом распределении в виде гистограммных столбиков. Массу частиц, уловленных на футеровке, отнесли к ситовой фракции мельче 80 мкм.

В качестве примера представлено полное массовое распределение частиц КПП топлива 2 (рис. 5, а) в виде гистограммы плотности распределения  $f(D)$  относительной массы частиц КПП по размерам  $f_i(D) = m_i / (M_{prop} \times \Delta D_i)$ , где  $D$  – размер частиц;  $m_i$  – масса частиц в  $i$ -том гистограммном интервале;  $M_{prop}$  – масса топлива (суммарная масса образцов в серии);  $\Delta D_i$  – ширина  $i$ -го интервала [6]. В дальнейшем индекс  $i$  опускаем, а функцию  $f(D)$  для краткости называем массовым распределением. В таком представлении площадь под кривой пропорциональна массе. Видно, что основную массу КПП составляет фракция 280–1 000 мкм, а вклад фракций 80–160 и 160–280 мкм сравнительно мал.

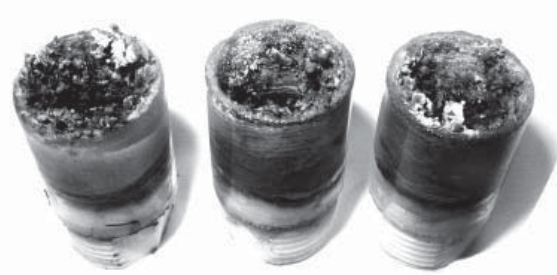


Рис. 4. Остатки горения на стенках стаканчика

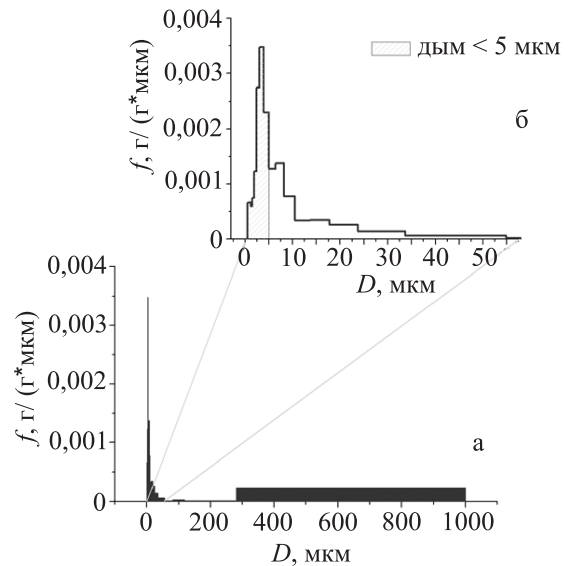


Рис. 5. Полное массовое распределение частиц КПП для топлива 2 (вверху: фрагмент в диапазоне размеров 0,5–58 мкм в увеличенном масштабе по оси абсцисс)

Рассмотрим особенности массового распределения частиц мельче 80 мкм (рис. 5, б). Как видно, масса частиц сосредоточена в основном в диапазоне 0,5–55 мкм. (Размеры частиц приводятся здесь в соответствии с гистограммными интервалами гранулометра «Малверн».) Имеются локальные максимумы (моды) в интервалах 0,5–1,2, 3–3,9 и 6–8,2 мкм, причем наиболее выраженный пик расположен в трех интервалах, соответствующих диапазону 2,4–5 мкм. Указанные особенности наблюдаются для частиц КПП исследованных топлив 1–3. Поэтому было принято решение характеризовать массу окисного дыма  $m_{smoke}$  в общей массе КПП как вклад частиц с размером мельче 5 мкм (заштрихованная область на рис. 5, б). Численное значение  $m_{smoke}$  получали из функции массового распределения  $f(D)$  расчетным путем.

Для удобства анализа плотность распределения относительной массы КПП на рис. 6 представлена в виде гистограмм из 5 стол-

бики: 0–5 мкм – дым; 5–80, 80–160 мкм – ситовая фракция; 160–280 мкм – ситовая фракция; 280–1000 мкм – шлак в стаканчике плюс остаток на сите 280 мкм. На рис. 6, а массы фракций отнесены к массе топлива  $m_{prop}$ , на рис. 6, б – к массе титана  $m_{Ti}$  в образце топлива. Фракция 280–1000 мкм представляет основную массу КПП, и составляет 15–24 % от массы топлива. Масса дыма невелика – менее 2 % от массы топлива. Сравнение распределений (рис. 6, а) показывает, что при увеличении содержания титана масса всех фракций (в том числе дыма) возрастает. Однако это увеличение связано именно

с увеличением массы титана в образце. Как демонстрирует рис. 6, б, относительно массы титана в образце масса дыма почти не изменяется, в то время как относительно массы образца (рис. 6, а), эта фракция заметно больше в случае топлива с 26,1 % титана.

Выход дыма с единицы массы титана в образце (отношение  $m_{smoke} / m_{Ti}$ ) составляет 5–6 % и немного возрастает при увеличении содержания титана в топливе (рис. 7). Однако уменьшение общей массы отобранных КПП  $m_{CCP}$  по отношению к максимальной теоретически возможной  $(m_{CCP})_{max}$  (рис. 8) свидетельствует о снижении полноты сго-

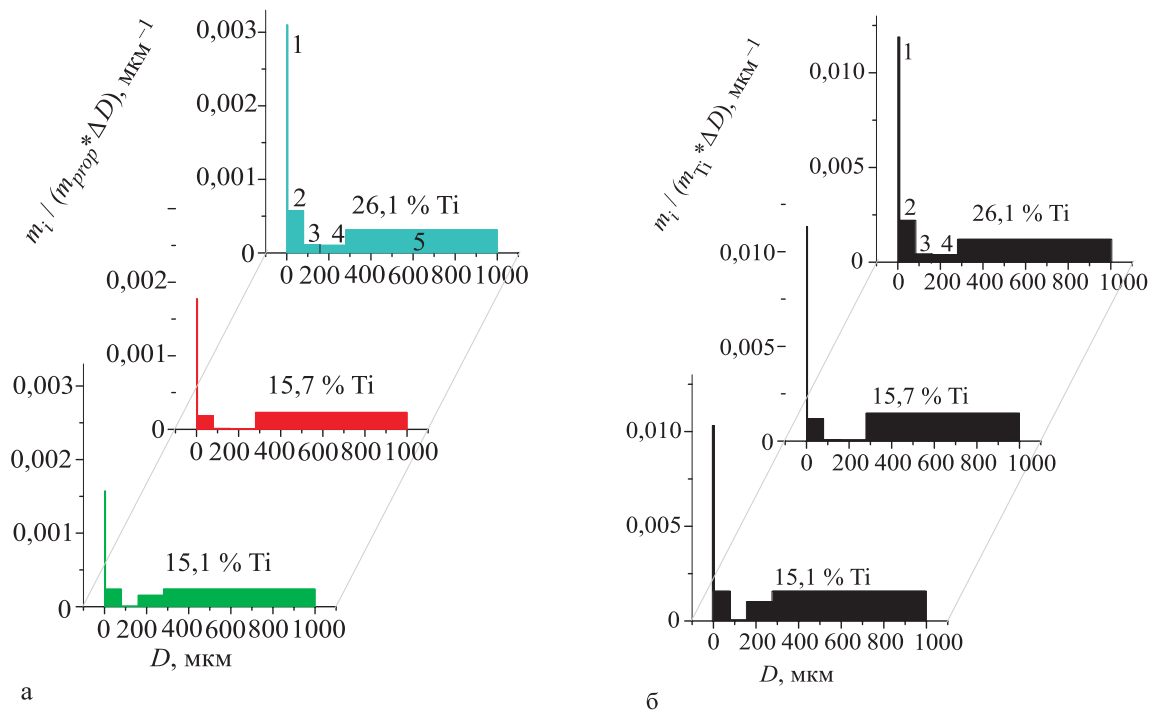


Рис. 6. Плотность распределения относительной массы КПП при вариации процентного содержания титана в топливе: а – массы фракций отнесены к массе топлива; б – массы фракций отнесены к массе титана. На верхней гистограмме цифрами 1...5 помечены фракции КПП

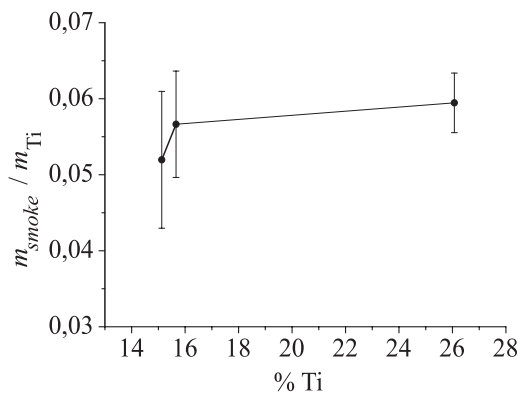


Рис. 7. Зависимость выхода дыма (частиц мельче 5 мкм) с единицы массы титана от содержания титана в топливе

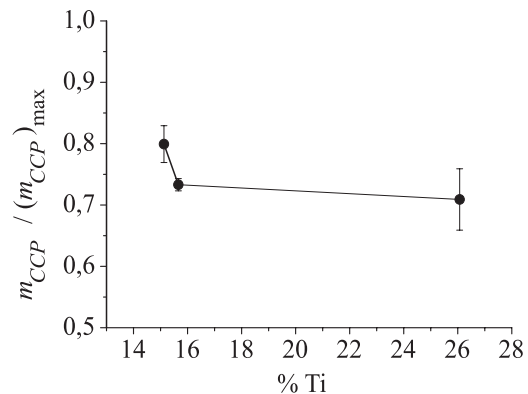


Рис. 8. Зависимость отношения суммарной массы КПП к теоретически максимальной к содержанию титана в топливе

рания металла при увеличении содержания титана в топливе. Величина  $(m_{CCP})_{\max}$  вычислена из соотношения  $(m_{CCP})_{\max} = 1,668 * m_{Ti}$ , где 1,668 – стехиометрический коэффициент перехода массы титана в массу  $TiO_2$ . Чем больше  $m_{CCP} / (m_{CCP})_{\max}$ , тем выше полнота сгорания.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. По аналогии с алюминием, будем считать, что увеличение скорости горения топлива способствует снижению агломерации, а увеличение содержания металла – усилению агломерации. Для рассматриваемых топлив последний фактор оказывается более значимым: увеличение содержания титана в топливе приводит к усилению его агломерации, несмотря на возрастание скорости горения (рис. 9). При этом увеличивается как масса остатков в стаканчике, так и размер частиц, вылетающих с поверхности образца. В наших экспериментах время горения частиц ограничено временем их пребывания в установке (от выхода с поверхности горения до отбора на сетки). Крупные частицы не успевают полностью сгореть, поэтому увеличение размера частиц приводит к снижению полноты сгорания.

Совокупность данных, представленных на рис. 6–9, позволяет заключить, что для рассматриваемых топлив увеличение содержания титана более 16 % нецелесообразно, так как фактически приводит к значительному возрастанию массы остатков и весьма слабому увеличению выхода оксидного дыма.

Для топлива 2 был проведен качественный рентгенофазовый анализ частиц непосредственно на фильтре с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, Inc.). Наблюдаемые в диапазоне углов  $10-70^\circ$  рефлексы соответствуют различным кристаллическим модификациям  $TiO_2$ : в основном рутил, также присутствуют анатаз и брукит. «Тяжелые» оксиды ( $Ti_2O_3$  и пр.) и нитриды титана не обнаружены.

#### Характеристики частиц в наноразмерном диапазоне

Эксперименты по изучению наноразмерного оксида проводили при атмосферном давлении для топлив 4 и 5 (см. табл. 1) в двух вариантах.

В первом варианте образец топлива (см. рис. 1) сжигали в 20-литровом сосуде, наполненном чистым воздухом, т. е. воздухом, очищенным от атмосферных аэрозолей путем фильтрации. Через заданный промежуток времени после сгорания образца пробу оксидного аэрозоля откачивали и направляли в термореприципитатор [7]. Уловленные частицы затем анализировали при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Подробности метода см. в [4; 5; 8]. Основное отличие от ранее проведенных экспериментов заключается в том, что в данной работе использованы топлива, не содержащие ПХА. Оказалось, однако, что, как и в случае топлив с ПХА [4; 5; 8], аэрозольные частицы дыма представляют собой агрегаты цепочно-разветвленной формы с размером  $0,1-10$  мкм, состоящие из первичных частиц – сферул – диаметром  $8-130$  нм. Примеры агрегатов показаны на рис. 10.

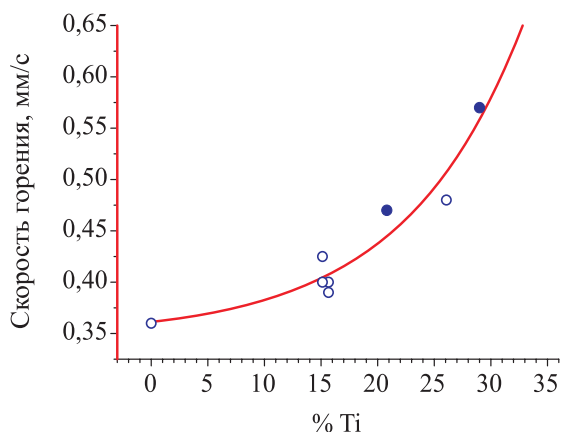


Рис. 9. Зависимость скорости горения от содержания титана в топливе. Закрашенные точки – топлива 4 и 5, незакрашенные – топлива, содержащие ПХА

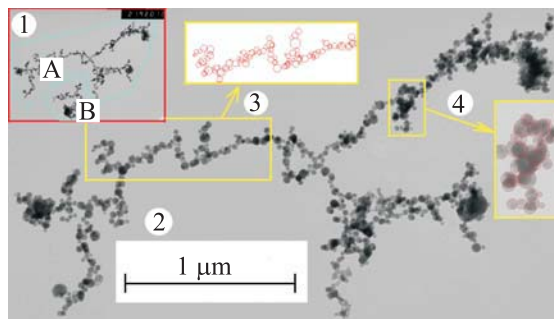


Рис. 10. ПЭМ-изображения аэрозольных агрегатов оксидных наночастиц и их обработка: 1 – электронно-микроскопическая фотопластинка с изображением двух агрегатов А и В; 2 – увеличенное изображение агрегата А с масштабом; 3 – фрагмент изображения агрегата А и соответствующий фрагмент его цифровой модели; 4 – иллюстрация работы программы обработки – выделение кругов на изображении

Для обработки ПЭМ-изображений агрегатов использовали оригинальную компьютерную программу, которая позволяет выделить круги, соответствующие сферам, и создать *цифровую модель агрегата* – совокупность диаметров и координат центров всех сферул, составляющих агрегат. На основе такой информации можно вычислить множество параметров, характеризующих структуру и морфологию агрегата. Здесь ограничимся рассмотрением двух основных параметров – размера сферул и фрактальной размерности агрегатов.

Во втором варианте для определения размера сферул использовали диффузионный аэрозольный спектрометр ДСА, созданный в ИХКГ СО РАН [9]. Прибор объединяет диффузионную батарею, конденсационный укрупнитель и оптический счетчик частиц и позволяет определять счетную концентрацию (в диапазоне от 0 до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ ) и распределение по размерам (в диапазоне от 3 до 200 нм) аэрозольных частиц. Длительность измерительного цикла – 4 минуты, поэтому этот метод можно считать экспрессным (по сравнению с весьма трудоемкой обработкой ПЭМ-изображений). Эксперименты проведены с топливами 4 и 5 следующим образом. Образец топлива с формой, близкой к конической, высотой около 1 см, без стаканчика и бронировки, сжигали в воздухе при атмосферном давлении. Отбор аэрозоля осуществляли во время горения непосредственно из факела через керамический капилляр длиной 3 см с внутренним диаметром 1 мм посредством создания разряжения (перепад давления 20 мм водяного столба по отношению к атмосферному), рис. 11.

Отобранный аэрозоль разбавляли чистым воздухом с расходом 600 л/ч и направляли в буферный 20-литровый сосуд, откуда

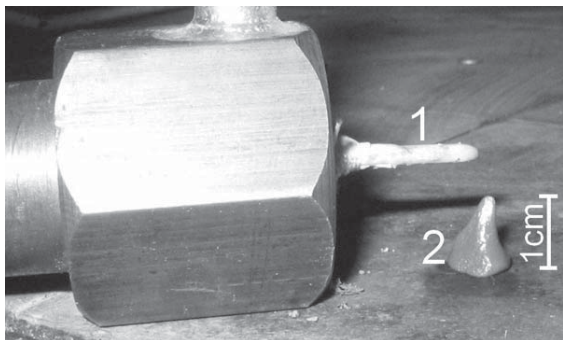


Рис. 11. Схема отбора аэрозоля из факела:  
1 – капилляр; 2 – образец

затем он поступал в аэрозольный спектрометр ДСА. Предполагается, что быстрое разбавление позволяет избежать образования агрегатов и определить характеристики сферул в факеле образца. Типичная концентрация аэрозоля в буферном сосуде составляла  $10^4$ – $10^5 \text{ см}^{-3}$ .

Результаты ДСА-измерений среднесчетного размера  $D_{10}$  сферул и данные, полученные путем детальной обработки ПЭМ-изображений агрегатов, представлены в табл. 2. Для накопления достаточно большого объема выборки данные для топлив 4 и 5 обрабатывали совместно. Для определения размера сферул использовали все имеющиеся на фотопластинках изображения агрегатов, всего обработано 7 393 частицы.

Фрактальную структуру агрегатов можно характеризовать фрактальной размерностью  $D_f$ , определенной как показатель степени в зависимости массы агрегата  $M$  от его эффективного геометрического радиуса  $R$ :  $M \sim R^{D_f}$ . Указанные параметры определяли из обработки ПЭМ-изображений следующим образом. Массу агрегата вычисляли как сумму масс сферул, слагающих агрегат, при этом плотность материала сферул полагали равной  $3,95 \text{ г/см}^3$  (как у диоксида титана). Эффективный геометрический радиус (или «габаритный радиус») определяли как  $R = 0,5 \sqrt{LW}$ , где  $L$  – максимальная длина агрегата;  $W$  – максимальная ширина агрегата в направлении, перпендикулярном к  $L$ . Фрактальную размерность определяли по наклону прямой, соответствующей зависимости  $M \sim R^{D_f}$  в логарифмических координатах (рис. 12). Заметим, что такое определение  $D_f$  соответствует *средней по совокупности агрегатов* фрактальной размерности.

Точки, представленные на рис. 12, соответствуют агрегатам, образованным при горении топлив 4 и 5. Отборы проб проведены в интервале времени 0–10 мин после сгорания образца. Для определения фрактальной размерности использовали только агрегаты, состоящие из сравнительно большого числа сферул и видимые на фотопластинке целиком (не выходящие за край кадра). Всего обработано 27 таких агрегатов, имеющих габаритный размер от 0,6 до 1,2 мкм. Количество сферул в агрегате варьировалось от 14 до 990 штук, в среднем 144 сферулы в агрегате. Общее число сферул в этих 27 агрегатах – 3 881 шт. Средняя удельная поверхность

Таблица 2

Сравнение размера сферул, определенного различными методами  
( $N$  – число измеренных сферул)

№ топлива	Метод	$D_{10}$ , нм	$N$ , штук
4	экспрессный – ДСА	23	–
5	экспрессный – ДСА	25	–
4 и 5	детальная обработка ПЭМ-изображений	23	7 393
на основе ПХА [5]	детальная обработка ПЭМ-изображений	23	> 20 000

(суммарная поверхность сферул, отнесенная к массе агрегата) составляет  $48 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Определенное по графику рис. 12 значение  $D_f = 1,55 \pm 0,13$ . Для сравнения, на рис. 12 показаны точки для 7 агрегатов топлив с ПХА, обработанных в [5] аналогичным образом. Очевидно, что эти точки укладываются в полученную здесь зависимость. Действительно, в [5] было получено такое же значение  $D_f = 1,55 \pm 0,10$ .

#### Заключение

В работе показана возможность создания бесхлорного топлива с титаном, устойчиво горящего при атмосферном давлении и комнатной начальной температуре с выбрасыванием горящих и взрывающихся частиц титана, образующих наноразмерный оксид. Титан, подобно алюминию, в волне горения агрегирует, поэтому размер частиц-агломератов, покидающих поверхность горения, значительно больше начального размера частиц металла, заложенного в топливо. Более того, при горении исследованного типа топлив образуется остаток в виде спеченных частично окисленных частиц металла. Оба фактора (агломерация и образование остатков) негативно влияют на полноту сгорания титана. Суммарная масса КПП в лучшем случае достигала 80 % от максимальной возможной, соответствующей полному превращению титана в диоксид, что указывает на неполное сгорание металла. В результате массовый выход оксидного дыма (частицы мельче 5 мкм) невелик и составляет 5–6 % от массы титана в образце. Поэтому требуется дальнейшая работа по оптимизации состава топлива и схем сжигания. Полученные данные позволяют предположить, что для снижения агломерации и массы остатка и соответственно для увеличения вы-

хода оксидного дыма следует повысить скорость горения топлива (либо собственную скорость горения топлива, либо эффективную, например, посредством организации канального горения, горения в условиях обдува и т. п.).

Характеристики наноразмерного оксидного аэрозоля, образуемого при горении исследованных топлив, подобны таковым для топлива с ПХА. В частности, практически совпадают величины характерного размера сферул ( $D_{10} = 23 \text{ нм}$ ) и фрактальной размерности агрегатов ( $D_f = 1,55$ ). Фактически, имеет место независимость характеристик оксидного дыма от состава топлива и начального размера горящих частиц титана. Вероятно, это обусловлено последовательными взрывами горящих частиц. В результате образование наночастиц обеспечивается горением фрагментов, а не исходных частиц титана или титановых агломератов.

Продемонстрирована возможность использования диффузионного аэрозольного

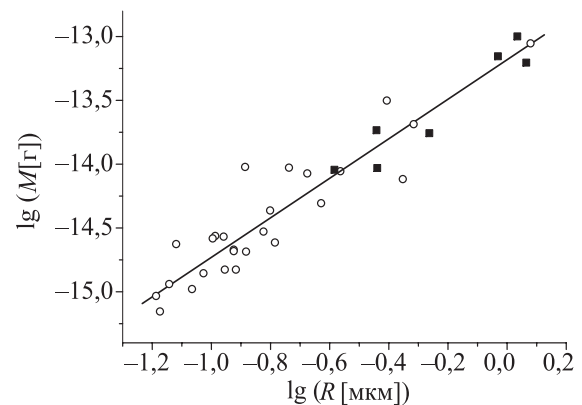


Рис. 12. Зависимость  $M$  от  $R$  в логарифмических координатах, полученная в результате обработки ПЭМ-изображений. Кружки – данные настоящей работы для топлив 4 и 5. Квадраты – данные [5] для топлив с ПХА



спектрометра ДСА для определения размера сферул, отобранных непосредственно из факела горящего топливного образца. Средний размер сферул  $D_{10}$ , определенный с помощью ДСА в течение нескольких минут, совпадает с размером, полученным в результате трудоемкой детальной обработки ПЭМ-изображений аэрозольных частиц, отобранных термопреципитатором.

#### Список литературы

1. Weiser V., Neutz J., Eisenreich N. et al. Development and characterization of pyrotechnic compositions as counter measures against toxic clouds // *Energetic Materials: Performance and Safety*. 36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar, June 28 – July 1, 2005. Karlsruhe: ICT, 2005. P. 102-1–102-12.
2. Miyata K., Kubota N. Combustion of Ti and Zr Particles with  $KNO_3$  // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1996, Vol. 21. No. 1. P. 29–35.
3. Berger B., Mathieu J. Alkali dinitramide salts oxidizers for special pyrotechnic applications // *Energetic Materials: Reactions of Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. 34th Int. Annual Conference of ICT, June 24 – June 27, 2003. Karlsruhe, 2003. P. 38-1–38-15.
4. Karasev V. V., Onischuk A. A., Khromova S. A. et al. Peculiarities of oxide nanoparticle formation during metal droplet combustion // *Energetic Materials – Insensitivity, Ageing, Monitoring*. 37th International Annual Conference of ICT. June 27 – June 30, 2006. Karlsruhe: ICT, 2006. P. 124-1–124-12.
5. Karasev V. V., Onischuk A. A., Khromova S. A. и др. Образование наночастиц оксида металла при горении капель Ti и Al // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42, № 6. С. 33–47.
6. Готов О. Г., Зырянов В. Я. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.
7. Gonzalez D., Nasibulin A. G., Baklanov A. M. et al. A New Thermophoretic Precipitator for Collection of Nanometer-Sized Aerosol Particles // *Aerosol Science and Technology*. 2005. Vol. 39. P. 1–8.
8. Karasev V. V., Onischuk A. A., Glotov O. G. et al. Formation of charged aggregates of  $Al_2O_3$  nanoparticles by combustion of aluminum droplets in air // *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138. P. 40–54.
9. Ankilov A., Baklanov A., Mavliev R., Eremenko S. Comparison of the Novosibirsk diffusion battery with the Vienna electromobility spectrometer // *J. Aer. Sci.* 1991. Vol. 22. P. S325.

Материал поступил в редколлегию 27.06.2007