УДК 536.46 DOI: 10.15372/PMTF202215111

## ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ С ТИТАНОМ

Н. С. Белоусова\*,\*\*, О. Г. Глотов\*,\*\*, И. В. Сорокин\*

\* Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

\*\* Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия E-mails: nata.bel.94@mail.ru, glotov@kinetics.nsc.ru, sorokin@kinetics.nsc.ru

Исследован процесс горения 12 смесевых топлив следующего состава: 60 % перхлората аммония ситовой фракции (180 ÷ 250 мкм) — 20 % активного горючего связующего — 20 % титана различной дисперсности и природы (с частицами губчатой формы размером  $d = 32 \div 71$  мкм и с обкатанными частицами псевдосферической формы размером  $d = 71 \div 500$  мкм). Определены скорости горения и параметры агломерации металлического компонента при давлениях 0,35 МПа в азоте и 0,1 МПа в воздухе. Установлено, что агломераты с минимальными размерами образуются при использовании порошков титана с частицами наименьших размеров.

Ключевые слова: частицы титана, горение, смесевое топливо, агломерация, размер агломератов

Введение. Технологическое горение частиц титана в воздухе может использоваться в качестве пиротехнического "генератора" для создания облака частиц фотокаталитического диоксида титана с целью очистки атмосферного воздуха от локального загрязнения токсичными веществами [1]. Для реализации этого подхода необходимо обеспечить достаточно полное сгорание агломератов металла и его эффективное преобразование в высокодисперсный оксид с требуемыми характеристиками [2, 3].

Целью настоящей работы является изучение основных характеристик горения смесевых топлив с частицами титана различного типа и размера. В первую очередь представляет интерес определение скорости горения и гранулометрического состава продуктов горения, особенно крупных частиц-агломератов.

1. Исследуемые образцы. Исследованы характеристики горения смесевых топлив, имеющих следующий компонентный состав: массовая доля активного связующего 20 %, массовая доля перхлората аммония (ПХА) ситовой фракции (180÷250 мкм) 60 %, массовая доля порошка титана 20 %. В качестве горючего связующего использовался метилполивинилтетразольный полимер, пластифицированный нитроэфирно-нитраминным пластификатором [4]. В топливах использовался титан двух типов: промышленный (марки ПТМ) и пористый, размер частиц составлял 32÷500 мкм. Пористые "осференные" частицы были получены посредством обкатывания порошка ПТМ в шаровой мельнице АГО-2 (рис. 1). В таблице приведены составы рассматриваемых модельных смесевых топлив. Такие частицы можно рассматривать как новый вид титанового металлического горючего.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-33-90208 "Аспиранты").

<sup>©</sup> Белоусова Н. С., Глотов О. Г., Сорокин И. В., 2023



Рис. 1. Микрофотографии порошков титана: *a* — губчатый титан марки ПТМ, *б* — пористый обкатанный титан

Вид топлива	Характерный размер частиц, мкм	Тип Ті	Фракция Ті, мкм	$m_{80}$
S1 S2 S3 S4	32 45 57 67	ПТМ	<32 40 ÷ 50 50 ÷ 63 63 ÷ 71	$\begin{array}{c} 0,098\pm 0,001\\ 0,154\pm 0,008\\ 0,170\pm 0,002\\ 0,180\pm 0,001\end{array}$
S5 S6 S7 S8 S9 S10 S11 S12	$71\\86\\113\\143\\170\\215\\283\\408$	Пористый обкатанный	$<71 71 \div 100 100 \div 125 125 \div 160 160 \div 180 180 \div 250 250 \div 315 315 \div 500$	$\begin{array}{c} 0,124\pm 0,005\\ 0,183\pm 0,004\\ 0,195\pm 0,004\\ 0,198\pm 0,002\\ 0,227\pm 0,002\\ 0,222\pm 0,001\\ 0,210\pm 0,001\\ 0,208\pm 0,003\\ \end{array}$

Размеры частиц титана и безразмерная масса  $m_{80}$  для различных видов топлива

**2.** Методики исследований. Экспериментальные исследования процесса горения смесевых топлив проводились в двух вариантах: в сосуде высокого давления в азоте при давлении 0,35 МПа и в воздухе при атмосферном давлении.

В первом случае малогабаритный сосуд высокого давления (бомба) имеет объем 0,33 л, внешний диаметр 90 мм и рассчитан на давление до 3 МПа. Бомба снабжена окнами диаметром 30 мм для видеозаписи процесса горения, системами контроля и регистрации давления и предназначена для отбора конденсированных продуктов горения в жидкость. В экспериментах требовалось определить скорость горения и характеристики агломератов, покидающих поверхность горения. При сжигании исследуемого образца диаметром и высотой 5 мм проводилась видеосъемка процесса горения, скорость съемки составляла 24; 480 кадр/с. Отбор конденсированных продуктов горения осуществлялся в сосуд с дистиллированной водой объемом 100 мл, помещенный внутрь бомбы. В экспериментах в бомбе факел образца направлен вниз, расстояние от начальной поверхности образца до поверхности жидкости равно 1,5 см. По окончании эксперимента бомба находилась в состоянии покоя в течение 2 мин для осаждения мелких частиц в воду. После сброса давления сосуд с суспензией извлекался из бомбы. Суспензия процеживалась через сито с размером ячеек 80 мкм. Остаток на сите высушивался при комнатной температуре, взвешивался, и определялась безразмерная масса агломератов  $m_{80}$  ( $m_{80}$  — отношение массы агломератов размером более 80 мкм к массе образца топлива до проведения эксперимента). Затем с использованием оптического проекционного микроскопа Carl Zeiss Pictoval проводился гранулометрический анализ агломератов.



Рис. 2. Зависимость скорости горения r топлив от размера частиц титана: a — в бомбе при p = 0.35 МПа,  $\delta$  — в воздухе при атмосферном давлении; 1 — титан марки ПТМ, 2 — пористый обкатанный титан

В экспериментах в воздухе при атмосферном давлении факел образца был направлен вверх, отбор продуктов горения проводился в поддон диаметром 24 см. Образец устанавливался в центре поддона и имел те же размеры, что и в первом случае. Определялись скорость горения и функция распределения отобранных частиц по размерам.

3. Результаты исследования. В экспериментальных исследованиях процесса горения образцов в бомбе при давлении p = 0.35 МПа и в воздухе при p = 0.10 МПа определена скорость горения топлив, содержащих титан варьируемой дисперсности, а также безразмерная масса агломератов  $m_{80}$  (см. таблицу). На основе полученных данных построены зависимости скорости горения топлив r от среднего размера частиц титана (рис. 2).

Скорость горения в бомбе при p = 0.35 МПа топлив, содержащих титан марки ПТМ с размером частиц  $D = 40 \div 70$  мкм, составляет  $4 \div 5$  мм/с (см. рис. 2,*a*). Для топлив с размером частиц Ті менее 32 мкм скорость горения меньше: r = 2 мм/с. Для топлив, содержащих пористые частицы титана, скорость горения имеет максимальное значение r = 2.9 мм/с при размере частиц Ті 160 ÷ 180 мкм. С увеличением размера частиц от 71 до 180 мкм скорость горения топлива возрастает с 2,0 до 2,9 мм/с, а в диапазоне значений  $D = 180 \div 500$  мкм уменьшается до 2,2 мм/с (см. рис. 2,*a*).

Для топлив, содержащих частицы титана марки ПТМ размером  $D = 40 \div 71$  мкм, максимальная скорость горения в воздухе равна  $r \approx 1,0$  мм/с. Для топлив с частицами титана марки ПТМ размером D < 32 мкм и пористого титана размером  $D = 71 \div 500$  мкм скорость горения в воздухе изменяется незначительно, в пределах погрешности (см. рис.  $2, \delta$ ), и составляет  $r \approx 0,7$  мм/с.

На рис. 3 приведены нормированные функции плотности распределения относительной массы частиц-агломератов по размерам (нормировка проводилась таким образом, чтобы площадь области, расположенной ниже кривой, была равна единице).

На основе полученных экспериментальных данных установлено, что для исследованных топлив (20 % Ti — 20 % связующего — 60 % ПХА) агломераты минимальных размеров образуются при использовании порошков титана с частицами наименыших размеров. Этим принципиально различаются процессы агломерации титана и алюминия. Среди исследованных топлив минимальные размеры агломератов зарегистрированы при использовании порошка титана марки ПТМ фракции <32 мкм (S1 в таблице) и пористого титана фракции <71 мкм (S5 в таблице).



Рис. 3. Функции плотности распределения относительной массы агломератов по размерам в случае отбора при горении топлив в азоте при p = 0.35 МПа: a-e — топлива, содержащие титан марки ПТМ (a — S1, b — S2, b — S3, e — S4), d-m — топлива, содержащие пористый обкатанный титан (d — S5, e — S6, m — S7, s — S8, u — S9,  $\kappa$  — S10, n — S11, m — S12)

Заключение. В работе проведено исследование процесса горения смесевых топлив на основе ПХА, активного горючего связующего и порошка титана с размерами частиц  $32 \div 500$  мкм. Установлено, что для исследуемых топлив с частицами минимальных размеров агломераты образуются при использовании порошков титана с частицами также наименьших размеров. В случае топлив, содержащих порошок титана марки ПТМ, это фракция D < 32 мкм, в случае пористого титана — фракция D < 71 мкм.

Авторы выражают благодарность М. А. Корчагину, О. Н. Житницкой, Д. Ю. Беляевой, А. В. Сухорукову, С. В. Трубиной за помощь в проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- Weiser V., Kelzenberg S., Knapp S., et al. Combustion behavior of metal particles as bulk materials under different gases // Proc. of the 7th Workshop on pyrotechnic combustion mechanisms, Rotterdam (Netherlands), 22 Aug. 2009. Kaiserslautern: Lutradyn, 2009. P. 15–16.
- 2. Глотов О. Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // Успехи физ. наук. 2019. Т. 189, № 2. С. 135–171.
- 3. Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С. Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. 1. Экспериментальные методики, времена горения и режимы фрагментации // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57, № 6. С. 20–31.
- 4. Кижняев В. Н., Голобокова Т. В., Покатилов Ф. А. и др. Синтез энергоемких триазоли тетразолсодержащих олигомеров и полимеров (обзор) // Химия гетероцикл. соединений. 2017. Т. 53, № 6/7. С. 682–692.

Поступила в редакцию 11/IV 2022 г., после доработки — 4/VI 2022 г. Принята к публикации 27/VI 2022 г.