

Влияние катализаторов на горение гетерогенных конденсированных систем

© **Архипов Владимир Афанасьевич**,^{1,2*} **Горбенко Татьяна Ивановна**,³
Жуков Александр Степанович³ и **Пестерев Алексей Викторович**³

¹ *НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета.*

Пр. Ленина, 36. г. Томск, 634050. Россия. Тел: (3822) 52-96-56. E-mail: leva@niipmtm.tsu.ru

² *Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук. Ул. Социалистическая, 1. г. Бийск, 659322. Россия. Тел: (3854) 30-14-43. E-mail: ipcet@mail.ru*

³ *Кафедра прикладной газовой динамики и горения. Томский государственный университет.*

Пр. Ленина, 36. г. Томск, 634050. Россия. Тел: (3822) 52-84-01. E-mail: gorbenkoti@rambler.ru

* Ведущий направление; ⁺ Поддерживающий переписку

Ключевые слова: диоксид кремния, хлорид олова, гетерогенные конденсированные системы, ультрадисперсный порошок алюминия, скорость горения.

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования скорости горения при атмосферном давлении гетерогенных конденсированных систем с каталитическими добавками – диоксидом кремния и хлоридом олова. Получены и проанализированы данные по влиянию катализаторов на скорость горения и содержание шлаков в продуктах сгорания в зависимости от типа горючего-связующего, окислителя и дисперсности порошка алюминия.

Введение

Гетерогенные конденсированные системы (ГКС) широко применяются в различных областях техники [1]. В ряде технических приложений необходимо управлять параметрами горения ГКС в зависимости от условий и целей их применения. Рецептное регулирование скорости горения связано, в основном, с введением в состав ГКС катализаторов горения, частичной или полной заменой традиционно используемого перхлората аммония другими окислителями, уменьшением размеров частиц окислителя и металлического горючего, повышением коэффициента избытка окислителя, использованием активных высокоэнергетических окислителей и горючих-связующих [1-4].

В [5-7] показана возможность регулирования скорости горения ГКС в (1.2-3.5) раз путем частичной или полной замены порошков алюминия микронных размеров промышленных марок АСД на ультрадисперсный порошок алюминия (УДП Al) марки *Alex*, получаемый методом электрического взрыва проволок в атмосфере аргона [8]. Дальнейшее повышение скорости горения требует существенного изменения компонентного состава конденсированных систем, в частности, увеличения процентного содержания УДП Al (более 15 % масс.). Это приводит к ухудшению энергетических и механико-прочностных характеристик ГКС.

Как правило, подбор веществ, регулирующих скорость горения гетерогенных конденсированных систем, проводят исходя из анализа влияния катализаторов на термическое разложение окислителей [3, 4]. Однако нельзя исключить возможность поиска эффективных добавок среди веществ, влияющих на ход реакций взаимодействия металлического горючего с продуктами распада менее термостойких составляющих гетерогенных смесевых композиций. Порошкообразный алюминий в силу высокой температуры горения широко используется в составах ГКС. Реакционная способность порошков алюминия во многом зависит от размеров частиц. В табл. 1 приведены характеристики порошка алюминия микронных размеров (АСД-4) и УДП Al марки *Alex* – среднемассовый диаметр D_{43} , удельная поверхность S и содержание чистого алюминия Z_{Al} [8].

Табл. 1. Характеристики порошков алюминия

Марка порошка	АСД-4	Alex
D_{43} , мкм	7.34	0.18
S , м ² /г	0.51	13.9
Z_{Al} , % масс.	95-97	88-90

Авторами [9] изучено влияние различных добавок на процесс и продукты горения ультрадисперсных порошков алюминия. Показано, что каталитические добавки влияют на температуру и длительность процесса горения, а также на состав конечных продуктов, в том числе на выход нитрида алюминия. Образование пос-

ледного в значимых количествах при горении микроразмерного алюминия не обнаружено.

Образование и стабилизация нитрида алюминия при горении ГКС являются нежелательными процессами. В работе [5] показано, что добавка хлорида олова практически не влияет на скорость горения смесевых композиций, содержащих микроразмерный алюминий марки АСД-4. Можно ожидать, что предотвращение образования нитрида алюминия при горении ГКС, содержащих УДП Al, приведет к росту тепловыделения и за счет этого заметно увеличится скорость горения.

Согласно [10], на процесс горения алюминия значительное влияние оказывает наличие на поверхности металлической частицы оболочки из тугоплавкого оксида алюминия. Процесс разрушения оксида алюминия возможен при взаимодействии последнего с углеродом, который содержится в продуктах сгорания ГКС. Взаимодействие оксида алюминия с углеродом происходит лишь в том случае, если в состав ГКС введен оксид карбидообразующего элемента (например, SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , Be_2O_3 , Cr_2O_3 и др.). Карбид алюминия может образовываться в виде нанодисперсных частиц. Можно предположить, что этот процесс будет способствовать снижению содержания конденсированных продуктов сгорания (шлаков).

Возможность регулирования скорости горения ГКС, содержащих порошки алюминия разной дисперсности, за счет дополнительного введения каталитических добавок требует детального изучения. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния каталитических добавок – хлорида олова и диоксида кремния – на характеристики горения некоторых модельных составов ГКС, содержащих порошок алюминия разной дисперсности [11, 12].

Экспериментальная часть

Исследуемые модельные конденсированные системы представляют собой многокомпонентные смеси порошков окислителя, металлического горючего, каталитической добавки и полимерного горючего-связующего. Модельную смесь получали методом механического перемешивания компонентов в смесителе типа “Бэкон” с самоочищающимися лопастями [5]. Для получения однородной массы на первом этапе перемешивали основные компоненты в течение 30 минут, затем в полученную смесь добавляли порошок хлорида олова или диоксид кремния и дополнительно перемешивали в течение 30 минут.

После вакуумирования в течение 30 минут полученную массу формовали методом проходного прессования в виде цилиндрических образцов диаметром 10 мм и высотой 30 мм во фторопластовые сборки. Полимеризацию образцов проводили при комнатной температуре в течение 24 часов. Затем образцы бронировали по боковой поверхности раствором линолеума в ацетоне. Отбраковку образцов проводили по критериям механической целостности и плотности. Для повышения воспроизводимости результатов экспериментов выбирали образцы, разброс плотности которых не превышал 0.02 г/см³.

В экспериментах измеряли скорость стационарного горения при сжигании образцов в торцевом режиме при атмосферном давлении на открытом воздухе при температуре 20 °С. При отработке новых составов исследование характеристик горения ГКС проводят, как правило, в широком диапазоне давлений, включая субатмосферные [2, 3, 13].

Измерение скорости горения образцов ГКС при давлении $p = 0.1$ МПа позволяет провести оценку механизмов влияния химической природы компонентов, их дисперсности, коэффициента избытка окислителя, катализаторов и тому подобное на процессы горения конденсированных систем [2, 3]. Кроме того, эти исследования имеют практическое значение при использовании ГКС в технических устройствах, работающих в условиях пониженных давлений, а также при анализе условий возникновения нестационарных режимов горения, связанных с потуханием пламени [2].

Скорость стационарного горения определяли методом перегорающих проволочек [3], методическая погрешность которого не превышает 2-3 %. Для каждого состава проводилось 8-10 дублирующих опытов. Статистическая обработка результатов проводилась с помощью стандартного пакета

Полная исследовательская публикация — Архипов В.А., Горбенко Т.И., Жуков А.С. и Пестерев А.В. *MathCad “Statistics”* в предположении, что распределение случайной погрешности результатов измерений является нормальным.

Относительная погрешность измерения скорости горения, связанная с разбросом характеристик образцов данного состава, при значении доверительной вероятности 0.95 не превышала 5%. Значения доверительных интервалов приведены в таблицах с данными экспериментов.

Содержание твердых конденсированных веществ в продуктах сгорания определяли взвешиванием на аналитических весах кварцевого отборника до и после сжигания образца. Массовая доля шлаков в продуктах сгорания z определялась отношением массы осевших в отборнике конденсированных частиц к массе исходного образца. Относительная погрешность определения z не превышала 1.5%.

Эффективность влияния катализаторов на характеристики горения ГКС оценивали коэффициентами K_1 и K_2 :

$$K_1 = \frac{u_1}{u_0}, \quad K_2 = \frac{z_1}{z_0},$$

где u_1, u_0 – скорость горения образцов с катализатором и без катализатора;
 z_1, z_0 – массовая доля шлаков в продуктах сгорания образцов с катализатором и без катализатора.

Погрешности определения коэффициентов K_1, K_2 рассчитывались в соответствии с алгоритмом оценки результатов косвенных измерений [14]:

$$\delta K_1 = \frac{\Delta K_1}{K_1} = \delta u \sqrt{1 + \frac{1}{K_1^2}}, \quad \delta K_2 = \frac{\Delta K_2}{K_2} = \delta z \sqrt{1 + \frac{1}{K_2^2}},$$

где $\delta K_1, \delta K_2, \Delta K_1, \Delta K_2$ – относительные и абсолютные погрешности определения коэффициентов K_1, K_2 ;

$\delta u, \delta z$ – относительные погрешности измерения скорости горения и содержания конденсированных продуктов сгорания.

Результаты и их обсуждение

Влияние каталитической добавки – хлорида олова (SnCl_2) – на характеристики горения ГКС исследовали на составах, содержащих инертное (СКДМ-80) и активные горючие–связующие (каучуки, пластифицированные нитросодержащими соединениями) марок НГУ, МПВТ-АСП, МПВТ-ЛД-70). В экспериментах использовались различные типы окислителей – перхлорат аммония (ПХА), нитрат аммония (НА), нитрамин (НМХ), а также их смеси (ПХА/НА, НА/НМХ при соотношении компонентов 1/1).

В составы ГКС вводили 15-20 % масс. ультрадисперсного порошка алюминия марки *Alex*. При проведении экспериментов исследовались составы без катализатора и эти же составы с добавлением порошка хлорида олова со средним размером частиц более 100 мкм.

Влияние количества вводимой добавки SnCl_2 на уровень скорости горения исследовалось для состава ГКС, содержащего в качестве окислителя перхлорат аммония, в качестве органического горючего–связующего – каучук СКДМ-80 (бутадиеновый каучук, пластифицированный трансформаторным маслом в соотношении 20/80), в качестве металлического горючего – УДП Al в количестве 15 % масс. Значение коэффициента избытка окислителя для данного ГКС составляло $\alpha = 0.5$. Зависимость коэффициента K_1 от содержания порошка SnCl_2 в составе ГКС приведена на рисунке.

Содержание катализатора варьировали в диапазоне 0.1-3.0 % масс. сверх 100% от массы ГКС. Экспериментально показано, что варьируя содержание порошка хлорида олова в составе ГКС от 0.1 до 2.0 % масс., можно получить увеличение скорости горения в диапазоне $K_1 = 1.12-1.77$. Дальнейшее повышение содержания хлорида олова (более 2.0 % масс.) нецелесообразно, поскольку приводит к снижению скорости горения ГКС. Аналогичные результаты по оптимальному содержанию порошка хлорида олова получены и для всех остальных исследованных составов ГКС.

Анализ результатов исследования влияния хлорида олова на скорость горения ГКС, содержащих инертное горючее–связующее (каучук СКДМ-80), показал, что для всех исследованных композиций при введении 1.9 % масс. SnCl_2 получено увеличение скорости горения

ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ГОРЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ _____ 34-41
в 1.23-2.39 раз. Увеличение значения коэффициента избытка окислителя от $\alpha = 0.4$ до $\alpha = 0.5$ незначительно влияет на величину K_1 . Наибольшее влияние на эффективность введения катализатора в состав ГКС с инертным горючим-связующим оказывает тип окислителя. Максимальное увеличение скорости горения исследованных систем получено для окислителей НМХ, ПХА и их смеси.

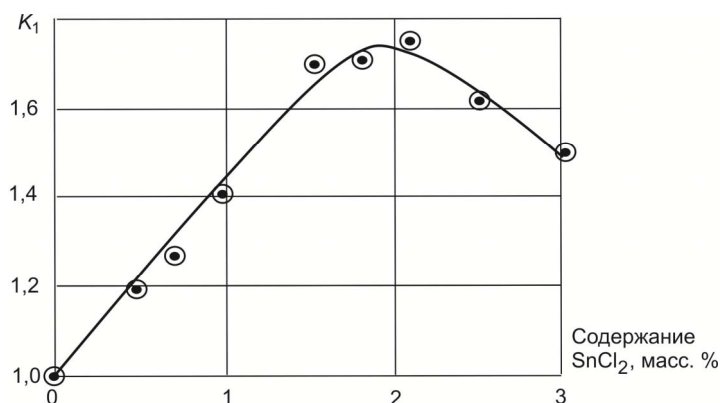


Рисунок. Эффективность добавки SnCl₂ в состав ГКС

Аналогичная серия экспериментов была проведена для ГКС на активных горючих-связующих при введении 2 % масс. порошка хлорида олова. Значения коэффициента избытка окислителя α , содержания УДП А1, плотности образцов, а также результаты измерения скорости горения и коэффициента эффективности введения катализатора K_1 для композиций на разных типах активных горючих-связующих приведены в табл. 2.

При проведении экспериментов варьировали значение коэффициента избытка окислителя α и содержание УДП А1 в составе ГКС. В качестве окислителей использовали перхлорат аммония, нитрат аммония, нитрамин и их смеси. Для всех исследованных составов на активных горючих-связующих введение 2 % масс. порошка SnCl₂ приводит к увеличению скорости горения ГКС в 1.60-1.75 раз.

Табл. 2. Характеристики горения ГКС с активными горючими-связующими

Горючее-связующее	Окислитель	α	$Alex$, % масс.	ρ , г/см ³	Скорость горения, мм/с		K_1
					u_0	u_1	
НГУ	ПХА	0.85	15	1.71	0.86±0.04	1.38±0.04	1.60
	НА		15	1.67	0.59±0.02	1.00±0.03	1.69
	ПХА		20	1.73	1.05±0.04	1.52±0.06	1.75
МПВТ-АСП	ПХА	0.85	15	1.72	0.66±0.03	1.12±0.04	1.70
	НА		15	1.67	0.43±0.02	0.73±0.03	1.70
	ПХА		20	1.73	0.80±0.04	1.29±0.05	1.61
	ПХА/НА		20	1.70	0.67±0.03	1.12±0.04	1.67
МПВТ-ЛД-70	НА/НМХ	0.54	16	1.70	0.77±0.03	1.23±0.05	1.60
			20	1.72	1.19±0.04	2.02±0.07	1.70

Влияние диоксида кремния (SiO₂) в качестве катализатора на характеристики горения ГКС исследовали при варьировании типа горючего-связующего, окислителя и дисперсности порошка алюминия. Компонентные составы ГКС приведены в табл. 3.

Составы А1 и А2 содержали 23.6 % масс. активного горючего-связующего марки НГУ (полиуретановый каучук, пластифицированный нитроглицерином, в соотношении 20/80), 61.4 % масс. нитрата аммония (НА) марки ЖВ со среднемассовым размером частиц (165-315) мкм и 15 % масс. порошка алюминия с разной дисперсностью марок АСД-4 или *Alex*.

Составы В1-В4 содержали 15.8 % масс. инертного горючего-связующего марки СКДМ-80, 69.2 % масс. перхлората аммония (ПХА) со среднемассовым размером частиц не более 50 мкм и 15 % масс. порошка алюминия (порошки АСД-4, *Alex* или их смеси в разных соотношениях). При проведении экспериментов исследовались рассмотренные составы без

Полная исследовательская публикация ____ Архипов В.А., Горбенко Т.И., Жуков А.С. и Пестерев А.В. катализатора и эти же составы с добавлением порошка диоксида кремния марки ХЧ со среднемассовым размером частиц не более 50 мкм.

Табл. 3. Компонентные составы ГКС

Состав	Содержание компонентов, % масс.					
	НГУ	СКДМ-80	ПХА	НА	АСД-4	Alex
A1	23.6	–	–	61.4	–	15.0
A2	23.6	–	–	61.4	15.0	–
B1	–	15.8	69.2	–	15.0	–
B2	–	15.8	69.2	–	12.0	3.0
B3	–	15.8	69.2	–	7.5	7.5
B4	–	15.8	69.2	–	–	15.0

В табл. 4 приведены результаты исследования влияния SiO_2 на скорость горения рассмотренных композиций при введении 2 % масс. диоксида кремния в состав ГКС.

Экспериментально установлено, что введение 2 % масс. SiO_2 в составы A1, A2 на активном горючем-связующем НГУ приводит к увеличению скорости горения в 1.25 раз для состава с Alex и в 1.59 раз для состава с АСД-4. Таким образом, катализатор SiO_2 более эффективен для ГКС, содержащих порошок алюминия микронных размеров, чем для систем с ультрадисперсным порошком алюминия.

Табл. 4. Влияние SiO_2 на скорость горения ГКС

Состав	Содержание Al, % масс.		u_0 , мм/с	u_1 , мм/с	K_1
	АСД-4	Alex			
A1	–	15.0	0.92 ± 0.03	1.15 ± 0.03	1.25
A2	15.0	–	0.61 ± 0.02	0.97 ± 0.03	1.59
B1	15.0	–	0.70 ± 0.02	0.89 ± 0.03	1.27
B2	12.0	3.0	1.20 ± 0.04	1.52 ± 0.05	1.27
B3	7.5	7.5	1.50 ± 0.05	1.96 ± 0.06	1.31
B4	–	15.0	1.30 ± 0.04	1.50 ± 0.05	1.15

Аналогичные результаты получены и для составов на инертном горючем-связующем СКДМ-80. В этом случае увеличение скорости горения составляет $K_1 = 1.27$ -1.31 для состава с АСД-4 (B1) и со смесями АСД-4/Alex (B2, B3). Для состава B4 с УДП Al (Alex) $K_1 = 1.15$, то есть эффективность влияния SiO_2 при этом меньше.

В табл. 5 приведены результаты исследования влияния SiO_2 на содержание конденсированных продуктов сгорания для составов A1, A2.

Табл. 5. Влияние SiO_2 на содержание шлаков в продуктах сгорания ГКС

Состав	Содержание Al, % масс.		z_0 , % масс.	z_1 , % масс.	K_2
	АСД-4	Alex			
A1	–	15.0	14.6 ± 0.2	13.0 ± 0.2	0.89
A2	15.0	–	39.1 ± 0.3	22.0 ± 0.2	0.56

результаты получены и для коэффициента K_2 , характеризующего влияние SiO_2 на содержание шлаков в продуктах сгорания.

Анализ результатов

Представленные результаты экспериментального исследования показали, что при горении ГКС, содержащих ультрадисперсный порошок алюминия в качестве металлического горючего, введение небольшого количества (2 % масс.) порошка хлорида олова приводит к существенному увеличению скорости горения при атмосферном давлении ($K_1 = u_1 / u_0 = 1.2 \div 2.4$). Данный эффект получен при варьировании компонентного состава

Из табл. 5 следует, что введение SiO_2 в состав гетерогенных конденсированных систем A1, A2 приводит к снижению содержания шлаков в продуктах сгорания на 11% для состава с Alex и на 44% – для состава с АСД-4. Подобные

ГКС в широких пределах – для инертных и активных горючих-связующих, а также для различных типов окислителей (перхлорат аммония, нитрат аммония, нитрамин и их смеси). Таким образом, хлорид олова является катализатором, влияющим на скорость горения рассматриваемых систем.

Полученный в экспериментах эффект увеличения скорости горения при введении в состав ГКС хлорида олова может быть связан со следующими факторами. Ранее было показано [9, 15], что процесс горения УДП алюминия в воздухе (то есть в азот-кислородной газовой среде) протекает в две стадии – при температурах 1200 °С на первой стадии и 2200-2400 °С – на второй.

В качестве одного из конечных продуктов обнаружена фаза нитрида алюминия AlN, массовая доля которого превышала 40-50 %. Аналогичный результат был получен и при изучении горения гелеобразных гетерогенных систем [16]. Образование значительного количества нитрида алюминия характерно также при горении ультрадисперсных порошков бора, кремния и титана [9]. Все эти вещества объединяет способность образовывать летучие субоксиды, которые, вероятно, выполняют роль интермедиантов при взаимодействии с азотом [17].

Анализ стадий горения показывает, что наиболее значимым источником теплоты при высоких температурах (более 2000 °С) является реакция окисления алюминия до Al₂O₃. Нитрид алюминия, образующийся из газообразных продуктов, «забирая» теплоту горения на себя, конденсируется и стабилизируется, покрываясь с поверхности оксидом или оксинитридом – устойчивыми при высоких температурах соединениями [9].

Отметим, что при горении частиц алюминия микронных размеров (порошков алюминия промышленных марок АСД, например) нитрид алюминия образуется в незначительных количествах на уровне следов [5]. Можно ожидать, что предотвращение образования AlN при горении УДП алюминия приведет к росту тепловыделения и, соответственно, к увеличению скорости горения ГКС.

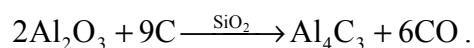
Авторами [17] показано, что при горении в воздухе ультрадисперсного порошка алюминия добавка олова приводит к снижению выхода AlN от 53 до 29 % масс. Таким образом, увеличение скорости горения ГКС при введении SnCl₂ можно объяснить подавлением химического связывания азота как процесса, значительно снижающего общий тепловой эффект реакции горения.

Высокая эффективность диоксида кремния (увеличение скорости горения и снижение содержания конденсированной фазы в продуктах сгорания) может быть связана со следующими факторами. Влияние диоксида кремния на характеристики горения ГКС, по-видимому, объясняется действием этой добавки на горение частиц алюминия. Согласно [10], на процесс горения алюминия значительное влияние оказывает наличие на поверхности металлической частицы оболочки из тугоплавкого оксида алюминия.

Температура плавления оксида алюминия (2303 К) существенно превышает температуру плавления алюминия (932 К). Полное сгорание алюминиевой частицы возможно при высоких температурах с появлением на оксидной оболочке дефектов, приводящих к окислению свободного металла. Оксид алюминия относится к основным оксидам и является одним из наиболее химически устойчивых [18].

Известно [19], что между основным и кислотными оксидами при температурах намного ниже точки плавления любого из компонентов начинают протекать реакции с образованием жидких эвтектик, что приводит к разрушению оксидной пленки при горении металлических частиц, а следовательно, к повышению полноты сгорания последних.

Процесс разрушения оксида алюминия возможен и при взаимодействии последнего с углеродом, который содержится в продуктах сгорания ГКС. Горение гетерогенных конденсированных систем – сугубо неравновесный процесс, поэтому в продуктах сгорания всегда находится некоторое количество углерода. Взаимодействие оксида алюминия с углеродом происходит лишь в том случае, если в состав компонентов добавлен оксид карбидообразующего элемента [10], то есть возможна реакция типа



Полная исследовательская публикация ____ Архипов В.А., Горбенко Т.И., Жуков А.С. и Пестерев А.В.

Карбид алюминия может образовываться в виде нанодисперсных частиц. Протекание подобных процессов отмечено при сгорании наночастиц алюминия [9].

Эффективность влияния диоксида кремния зависит от кристаллической природы оксидной пленки на поверхности алюминиевой частицы. Можно ожидать, что введение диоксида кремния в составы гетерогенных конденсированных систем, содержащих порошок алюминия микронных размеров (например, порошки промышленных партий АСД), будет более эффективно по сравнению с конденсированными системами, содержащими ультрадисперсные порошки алюминия (*Alex*). Данное предположение основывается на том, что в порошках алюминия марок АСД содержится больше активного металла, чем в УДП *Alex* (табл. 1).

Выводы

1. Экспериментально показано, что введение порошка хлорида олова в составы гетерогенных конденсированных систем, содержащие 15-20 % масс. ультрадисперсный порошок алюминия, приводит к увеличению их скорости горения при атмосферном давлении в 1.2-2.4 раз.
2. Экспериментально показано, что введение порошка диоксида кремния в составы гетерогенных конденсированных систем, содержащие 15 % масс. порошка алюминия, приводит к увеличению их скорости горения при атмосферном давлении в 1.25-1.59 раз и к снижению содержания конденсированных веществ в продуктах сгорания на 11-44 %. Тип горючего-связующего и окислителя не оказывает существенного влияния на эффективность действия каталитической добавки SiO_2 .
3. Показано, что оптимальное содержание катализаторов SnCl_2 и SiO_2 в рассмотренных составах гетерогенных конденсированных системах, обеспечивающее максимальное увеличение скорости горения и снижение содержания шлаков в продуктах сгорания, составляет 2 % масс.
4. С повышением дисперсности порошка алюминия (при частичной или полной замене порошка АСД-4 на ультрадисперсный порошок алюминия марки *Alex*) эффективность влияния SiO_2 как на скорость горения, так и на содержание шлаков в продуктах сгорания снижается.
5. Увеличение скорости горения гетерогенных конденсированных систем связано, по-видимому, с тем, что хлорид олова и диоксид кремния способствуют подавлению химического связывания азота и образованию нитрида алюминия как процессов, снижающих температуру горения.
6. Добавки хлорида олова и диоксида кремния не требуют изменения технологического режима изготовления гетерогенных конденсированных систем, включая технологию отверждения массы, формования образцов, а также изменения основного компонентного состава конденсированных систем. Введение веществ, способствующих взаимодействию алюминия с продуктами разложения исходных компонентов конденсированных систем, позволяет подобрать эффективные катализаторы для регулирования характеристик горения гетерогенных конденсированных систем.

Литература

- [1] Жуков Б.П. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. М.: Янус-К. 2000. 596с.
- [2] Чулков А.З., Скворцов И.Д., Шур М.С. Процессы горения топлив в РДТТ. Итоги науки и техники. Серия "Авиационные и ракетные двигатели". М.: ВИНТИ АН СССР. 1974. Т.1. 218с.
- [3] Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука. 1967. 226с.
- [4] Глазкова А.П. Катализ горения взрывчатых веществ. М.: Наука. 1976. 253с.
- [5] Горбенко Т.И. Закономерности горения высокоэнергетических гетерогенных систем, содержащих ультрадисперсный алюминий, в широком диапазоне давлений: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск. 2007. 141с.

- [6] Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф. и др. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием. *Физика горения и взрыва*. **2005**. Т.41. №6. С.80-94.
- [7] G.V. Sacovich, V.A. Arkhipov, A.B. Vorozhtsov et al. Investigation of HEM with aluminum nanopowders. *Nanotechnologies in Russia*. **2010**. Vol.5 No.1-2. P.91-107.
- [8] Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Лернер М.И. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия. *Горный журнал*. **2006**. №4. С.58-64.
- [9] Громов А.А., Ильин А.П., Архипов В.А. и др. Горение нанопорошков металлов. *Томск: Дельтаплан*. **2008**. 385с.
- [10] Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. *М.: Наука*. **1972**. 294с.
- [11] Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Горбенко Т.И., Коротких А.Г., Савельева Л.А., Сакович Г.В. Способ регулирования скорости горения смесового твердого топлива: *Патент 2423338 РФ Б.И.* **2011**. №19.
- [12] Архипов В.А., Беспалов И.С., Ворожцов А.Б., Горбенко Т.И., Савельева Л.А. Способ получения металлизированного твердого топлива: *Патент 2415906 РФ Б.И.* **2011**. №10.
- [13] Архипов В.А., Горбенко М.В., Горбенко Т.И., Савельева Л.А. Влияние ультрадисперсного алюминия на горение смесевых твердых топлив при субатмосферных давлениях. *Физика горения и взрыва*. **2009**. Т.45. №1. С.47-55.
- [14] Зайдель А.Н. Погрешности измерения физических величин. *Л.: Наука*. **1985**. 112с.
- [15] Громов А.А. Закономерности нитридообразования при горении нанопорошков алюминия в воздухе и азот-кислородных газовых смесях. *Изв. вузов. Физика*. **2006**. №6. С.52-56.
- [16] Архипов В.А., Савельева Л.А., Синогина Е.С. Характеристики воспламенения гелеобразных композиций *Изв. вузов. Физика*. **2006**. №6. С.11-15.
- [17] Ильин А.П., Яблуновский Г.В., Громов А.А. Влияние добавок на горение ультрадисперсного порошка алюминия и химическое связывание азота воздуха. *Физика горения и взрыва*. **1996**. Т.32. №2. С.108-110.
- [18] Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. *Киев: Наукова думка*. **1974**. 991с.
- [19] Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. *М.: Мир*. **1969**. 392с.