

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ СОЕДИНЕНИИ

Сейсенова А.Б.<sup>1,2</sup>, Акназаров С.Х.<sup>1,2</sup>, Байракова О.С.<sup>2</sup>, Головченко Н.Ю.<sup>1,2</sup>,

Капизов О.С.<sup>2</sup>, Хуан Мария Гонсалес-Лил<sup>3</sup>

(1) Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби

(2) Научно-производственный технический центр «ЖАЛЫН»

(3) Университет Кадис

[Z\\_aknura@mail.ru](mailto:Z_aknura@mail.ru), [sestager@mail.ru](mailto:sestager@mail.ru), [ok\\_sir@mail.ru](mailto:ok_sir@mail.ru)

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния добавок на характеристики горения высокоэнергетических материалов на основе нитратов калия, аммония и натрия, каучука марки СКДМ-80. Для разработки новых оптимальных компонентов высокоэнергетических материалов в проводимой работе в качестве металлического горючего вместо алюминия марки АСД-6 использовалась алюминиевая пудра марки ПАП-1 и смесь пудры с алюминием АСД-6. В работе экспериментально показана возможность увеличения скорости горения в 1,5 – 3 раза и повышение температуры горения топлива при использовании алюминиевой пудры. Введение оксида кремния в состав высокоэнергетической системы увеличивает скорость горения состава 3 содержащем алюминий 15% в смеси в 1,3 – 1,7 раза по отношению к базовому составу. Влияние хлорида олова на характеристики горения высокоэнергетических систем исследовались на составах содержащих инертное горючее связующее каучук СКДМ-8 и активное горючее связующее, полиуретановый каучук. Существенное влияние на скорости горения оказывает добавка катализатора только на скорость горения состава, содержащего металлическое горючее в виде алюминия марки ПАП-1. Использование  $\text{SnCl}_2$  в составах с алюминием АСД-6 не приводит к

**изменению скорости горения системы. Полученные экспериментальные данные показали, что оптимальное количество вводимой добавки  $\text{SnCl}_2$  2% сверх 100 от общего веса топливной массы, свыше этой величины введение хлорида олова приводит к снижению коэффициента эффективности. Добавление  $\text{SnCl}_2$  2% в высокоэнергетическую смесь с активным горючим связующим приводит к увеличению скорости горения в  $1,64 \pm 1,87$  раз. Содержание огарков для всех систем 8-10%. Остаточное содержание алюминия в огарке 0.2- 0.6%.**

**Ключевые слова:** высокоэнергетические материалы, алюминий, связующее, окислитель, горючее.

<sup>1</sup> 050012, г. Алматы, ул. Павлодарская, 11

## **ВВЕДЕНИЕ**

К современным и перспективным композициям высокоэнергетических материалов (ВЭМ) предъявляется ряд требований, включающих высокие значения энергетических и физико-химических характеристик, технологичность при формовании зарядов, длительный срок хранения, возможность регулирования скорости горения, минимальное содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания и др. Одновременное выполнение указанных требований проблематично, поэтому при разработке компонентных составов высокоэнергетических материалов приходится искать компромиссные решения, выбирая приоритетные характеристики исходя из целей использования высокоэнергетических материалов.

Современные составы высокоэнергетических материалов, используемые в качестве твердых топлив базируются, в основном на трех компонентах:

окислитель-перхлорат аммония, полимерное горючее-связующее и порошкообразный алюминий. Перхлорат аммония является достаточно дорогим веществом и также время основным источником экологически неблагоприятных продуктов сгорания.

Одним из перспективных направлений в решении проблемы создания экономичных и экологически чистых высокоэнергетических материалов является использование окислителей не содержащих соединений хлора, замена широко используемого перхлората аммония на полностью или частично на нитрат аммония или другие окислители для получения высоких энергетических характеристик топлива.

Наряду с обеспечением энергетических характеристик (удельного импульса тяги) к разрабатываемым композициям гетерогенных высокоэнергетических систем предъявляются требования возможности регулирования скорости горения [1], удельный импульс возрастает с повышением температуры горения, а скорость горения пропорциональна удельному импульсу[2-4].

В зависимости от конкретного назначения высокоэнергетических гетерогенных конденсированных систем, требуется разработка композиций возможностью регулирования скорости в широком диапазоне (0,3-250 мм/с).

Таблица 1.

Таблица 1 – Требования к скорости гетерогенных высокоэнергетических конденсированных систем[5].

Область применения	Скорость горения, мм/с
Стартовые и тормозные двигатели	15÷250
Маршевые двигатели	5÷25.0

Газогенераторы	0.3÷5.0
Двигатели систем управления	1.3÷13.0
Двигатели исследовательских ракет	2.5÷25.0
Верньерные двигатели	5÷2.5

В частности при разработке топливных систем для наддува подушек безопасности требуется гетерогенные конденсированные системы с высокой скоростью горения и для регулируемых твердо топливных ракетных двигателей систем ориентации космических аппаратов – гетерогенные высокоэнергетические системы с очень низкой скоростью горения.

**Разработка новых оптимальных компонентных составов твердого высокоэнергетического топлива.**

Оптимизация энергетических и экологических характеристик высокоэнергетических материалов возможна путем варьирования их компонентного состава. Рецептное регулирование скорости горения высокоэнергетических материалов в основном достигается введением в состав катализаторов горения, частичной или полной замены перхлората аммония другими окислителями, уменьшением частиц окислителя и металлического горючего, повышением коэффициента субъекта окислителя использование активных высокоэнергетических окислителей и горючих связующих, известно, что введение металлического горючего (в основном алюминия) приводит к значительному повышению скорости горения твердых топлив.

В проведенных экспериментах [6] было показано, что введения алюминия выше 15-20% от топливной массы приводят к снижению скорости горения и повышению содержания конденсированных продуктов горения и не полноте

выгорания алюминия. Предельное эффективное содержание алюминия зависит от типа окислителя и горючего – связующего в составе топлива.

Одной из наиболее важных проблем использования металлов в топлива является обеспечение полного сгорания металла.

Горение металлов, у которых температура кипения оксида существенно выше температуры кипения металла, происходит преимущественно в паровой фазе. Поэтому частицы таких металлов, как магний и алюминий, горят в диффузионном режиме, и если обеспечено воспламенение частиц и смешивание с окислителем (кислородом), то время необходимое для полного выгорания частиц, пропорционально квадрату их диаметра [7].

Одним из способов регулирования скорости горения высокоэнергетической конденсированной системы является замена штатных порошков алюминия марок АСД (АСД-1, АСД-4, АСД-6 и др.) [8] на ультрадисперсный порошок алюминия [8-9].

Для разработки новых оптимальных компонентов высокоэнергетических материалов в проводимой работе в качестве металлического горючего вместо алюминия марок АСД-6 использовалась алюминиевая пудра марка ПАП-1 и смесь пудры с алюминием АСД-6. В работе [6] экспериментально показана возможность увеличения скорости горения в 1,5 – 3 раза и повышение температуры горения топлива при использовании алюминиевой пудры.

Оптимальное количество алюминия для исследуемых систем на основе окислителей перхлората аммония, нитрата аммония и инертного горючего – связующего подобранное количество алюминия составляет составляет 15%. Дальнейшее увеличение количества алюминия приводят к снижению энергетических и механико-прочностных характеристик зарядов топлив.

Для обеспечения высоких энергетических характеристик композиций высокоэнергетических конденсированных систем содержащих инертное горючее связующее (каучук марки СКДМ-80) и окислители нитраты аммония и калия, перхлорат аммония и алюминий марок АСД-6 и пудры ПАП-1 исследован рецептурный способ регулирования скорости горения топливной системы. Способ основан на введении в состав высокоэнергетической системы смеси катализаторов, без существенного изменения компонентного состава топлива. В качестве катализаторов использованы диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) марки ХЧ, со средней дисперсностью не более 50 мкм и двухлористое олова ( $\text{SnCl}_2$ ) [10].

Разрабатываемые модельные высокоэнергетические системы представляют собой многокомпонентные смеси порошков окислителя, металлического горючего каталитической добавки и горючего- связующего. Компоненты топливной смеси тщательно перемешивались в течение 30 минут для получения однородной массы, затем вводились катализаторы и снова перемешивались в течение 30 минут.

Полученную массу формировали в виде цилиндрических образцов диаметром 10 мм высотой 25-30 мм. Плотность образцов отличалась на  $0,03 \text{ г/см}^3$ . Для изготовления образцов использовались разборные пресс-формы. По сушки образцов 24 часа их бронировали по боковой поверхности эпоксидной смолой. После 24 часов полимеризации смолы образцы помещались в эксикатор. Стационарная скорость горения измерялось при атмосферном давлении на открытом воздухе. Результаты брались среднеарифметическими из 3÷5 параллельных определений.

Влияния добавки диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) на энергетически характеристики высокоэнергетических систем на основе нитрата аммония.

Для компенсации снижения энергетических характеристик на основе нитрата аммония в состав топлива вводят добавки, повышающие эффективность топлива нитраминами, ультрадисперсные порошки аммония, каталитические добавки, активные горение связующие. В отличие от общепринятых путей выбора эффективных катализаторов горения по их влиянию на распад окислителя и реже на распад горючего -связующего в настоящей работе провели эксперименты по их влиянию на полноту и скорость окисления, а также возможность образования неагломерирующих продуктов сгорания металлического горючего. Основным штатным металлическим горючим в высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в настоящий время является алюминий различной дисперсности, то к таким веществам следует отнести соединения, влияющие на распад оксидной пленки алюминия [11].

В работе исследовалось влияние добавки диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), дисперсности порошков алюминия на скорость горения топлив с бесхлорным окислителем. Эксперименты проводились на двух базовых составах с коэффициентом избытка окислителя 0,5. Составы содержали нитрат аммония стабилизированный нитратом калия, инертное горючее связующее (каучук СКДМ-80), алюминий марки АСД-6 и алюминиевую пудру, содержание алюминия изменилась от 15 до 28% масс, за счет изменения соотношения нитрата аммония и горючего- связующего. В металлическом горючем содержание ПАП-1 варьировалось от 0 до 100 от расчетного содержания,  $\text{SiO}_2$  0-2 % сверх 100% от массы топлива. В таблице 2 приведены данные экспериментов.

Таблица 2 – Влияние диоксида кремния на скорость горения системы.

Номер	Содержание, % масс	Скорость	Скорость	К
-------	--------------------	----------	----------	---

сост.				горение	горение	SiO <sub>2</sub>
	SiO <sub>2</sub>	АСД-6	ПАП-1	$\vartheta$ мм/с	$\vartheta_{\text{SiO}_2}$ мм/с	
1	-	50	50	0,28 ±0,1		
3	2	100	-	0,98 ±0,1	1,49 ±0,1	1,52
	2		100	2,3 ±0,1	3,5 ±0,1	1,56
	2	50	50	1,5 ±0,1	2,3 ±0,1	1,53
4		100	-	1,0 ±0,1	1,28 ±0,1	1,28
		50	50	1,87 ±0,1	2,17±0,1	1,16

Введение оксида кремния в состав высокоэнергетической системы увеличивает скорость горения состава 3 содержащем алюминий 15% в смеси в 1,3 – 1,7 раза по отношению к базовому составу. Скорость горения топлива при введении в состав SiO<sub>2</sub> тем, выше, чем выше содержание в составе топлива алюминия марки ПАП-1.

Введение SiO<sub>2</sub> в состав топлива не содержащего металлическое горючее не влияет на скорость горения системы.

Исследовалось влияние добавки диоксида кремния на горение высокоэнергетических систем на основе активного горючего- связующего. В качестве активного горючего- связующего использовался полиуретановый каучук, пластифицированный нитроглицерином (марка НГУ)  $\alpha$  – 0,5.

Компонентный состав высокоэнергетического материала: горючее – связующее – 23,6 %, нитрат аммония – 61,4 %, алюминий (марок АСД-6, ПАП-1) – 15%. Добавка диоксида кремния 2 % сверх топливной смеси. Подготовка топливной смеси и изготовление образцов проводилась общепринятым способом (механическое смешивание компонентов, прессование, бронирование).

Эксперименты по определению скорости горения проводились на воздухе, поджиг контактный раскаленной нихромовой пластиной с торца образца. В таблице 3 приведены результаты проведенных экспериментов.



Таблица 3 – Влияние SiO<sub>2</sub> на скорость горения ВЭМ, содержащем активное горючее- связующее.

№ обр.	Содержание		Скорость горения $v_0$ мм/с	Скорость горения $v_{SiO_2}$ мм/с	К
	Al % масс				
	АСД-6	ПАП-1			
1	15	-	0,62±0,02	0,29±0,02	1,59
2	-	15	0,64±0,02	1,31±0,03	1,40
3	7,5	7,5	0,70±0,03	1,20±0,02	1,48
4	10	5	0,71±0,02	1,07±0,02	1,52
	5	10	0,70±0,03	1,17	1,42

Как и в случае горения высокоэнергетических материалов на основе инертного горючего – связующего добавка диоксида кремния приводит к увеличению скорости горения композиции. Более эффективно добавка SiO<sub>2</sub> для системы содержащей алюминий АСД.

Наибольший эффект наблюдается для систем, содержащих в составе алюминий марки АСД-6 (рисунок 1) приведена зависимость эффективности горения высокоэнергетического материала при добавке SiO<sub>2</sub>.

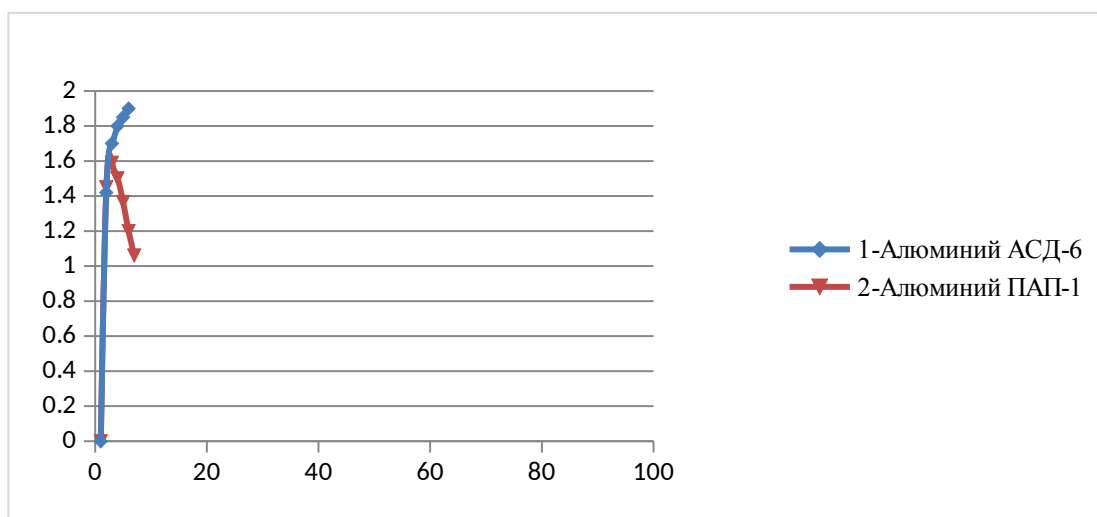


Рисунок 1. Влияние SiO<sub>2</sub> на показатель эффективности горения.

Анализ продуктов горения показал снижения конденсированных продуктов сгорания и полноту выгорания топлива.

Причиной высокой эффективности добавки диоксида кремния в состав ВЭМ может быть следующие факторы. Влияние оксида кремния  $\text{SiO}_2$  на характер горения ВЭМ, объясняется действием этой добавки на горение частиц алюминия. Согласно [11], на процесс горения алюминия значительное влияние оказывает наличие на поверхности металлической частицы пленки из тугоплавкого оксида алюминия.

Температура плавления оксида алюминия (2303К) существенно превышает температуру плавления алюминия (932К). Полное сгорание частицы алюминия возможно при высоких температурах с появлением на оксидной пленке дефектов, приводящих к окислению свободного металла. Оксид алюминия относится к основным оксидам и является наиболее химически устойчивым [12].

Известно [13], что между основными 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, повышению полноты сгорания последних.

Эффективность влияния диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  зависит от кристаллической природы оксидной пленки на поверхности алюминиевых частиц.

Можно ожидать, что введение  $\text{SiO}_2$  в состав высокоэнергетических материалов, содержащий порошок микронных размеров (АСД-6) будет эффективен по сравнению с системой содержащей порошок марки ПАП-1.

Данные результатов анализов (волюметрический) [6] подтверждают более высокую активность алюминия ПАП-1, вследствие отсутствует на поверхности

ПАП-1 оксидной пленки, что обусловлено способом его получения. Эффективность добавки SiO<sub>2</sub> не зависит от применяемого окислителя и горючего-связующего. Введение SiO<sub>2</sub> приводят к снижению содержания конденсированных веществ в продуктах сгорания на 11-44%.

**Влияние добавки двуххлористого олова (SnCl<sub>2</sub>) на энергетические характеристики высокоэнергетических систем на основе нитрата аммония.**

Влияние хлорида олова на характеристики горения высокоэнергетических систем исследовались на составах содержащих инертное горючее связующее каучук СКДМ-8 и активное горючее связующее, полиуретановый каучук. В качестве окислителей использовались нитрат аммония, нитрат калия и нитрамин, а также их смеси (НА/НС, НА/НМХ), металлические горючее – алюминий марки АСД-6 и пудра алюминиевая ПАП-1. Для экспериментов взят нитрат аммония фазостабилизированный не имеющий полиморфных переходов в температурном интервале -50<sup>0</sup>С, +50<sup>0</sup>С[14], скорость горения определялось на воздухе. В таблице 4 приведены скорости горения состава на основе каучука СКДМ-8, окислителя нитрата аммония, алюминия АСД-6 и алюминиевой пудры, в количестве 15% масс.

Таблица 4 – Влияние добавки хлорида олова SnCl<sub>2</sub> на скорость горения высокоэнергетической системы

Алюминий	Содержание SnCl <sub>2</sub> 6% свыше 100%	Скорость горения мм/с		К
		$\vartheta_0$ мм/с	$\vartheta_{ZnCl_2}$ мм/с	
АСД-6	0,0	0,78±0,02	0,78±0,02	1,0
АСД-6	0,5	0,78±0,03	0,79±0,03	1,0
АСД-6	1,0	0,78±0,03	0,79±0,03	1,00

АСД-6	2,0	0,78±0,02	0,80±0,02	1,03
ПАП-1	0,0	0,20±0,01	1,2±0,02	1,0
ПАП-1	0,2	1,20±0,02	1,34±0,02	1,12
ПАП-1	0,4	1,21±0,01	1,42±0,03	1,18
ПАП-1	0,6	1,21±0,02	1,48±0,02	1,23
ПАП-1	0,8	1,20±0,02	1,62±0,02	1,35
ПАП-1	1,0	1,21±0,01	1,68±0,02	1,39
ПАП-1	1,2	1,21±0,01	1,71±0,02	1,42
ПАП-1	1,4	1,20±0,03	1,87±0,01	1,56
ПАП-1	1,6	1,20±0,02	2,01±0,02	1,68
ПАП-1	1,8	1,21±0,03	2,02±0,03	1,69
ПАП-1	2,0	1,20±0,01	2,13±0,02	1,78
ПАП-1	2,4	1,20±0,02	2,04±0,02	1,70
ПАП-1	3,0	1,21±0,02	1,81±0,2	1,51

Поджиг образцов проводился с торцевой части, раскаленной пластиной, скорость, температура горения фиксировались помощью вольфрам-рениевых термопар шлейфовым осциллографом.

Анализ результатов экспериментов показал, что оптимальное содержание хлорида олова 2% масс сверх 100% смеси. На рисунке 2 показана графическая зависимость скорости горения высокоэнергетической системы для составов содержащих различные марки алюминия.

Полученные экспериментальные данные показали, что оптимальное количество вводимой добавки  $\text{SnCl}_2$  2% сверх 100 от общего веса топливной массы, свыше этой величины введение хлорида олова приводит к снижению коэффициента эффективности.

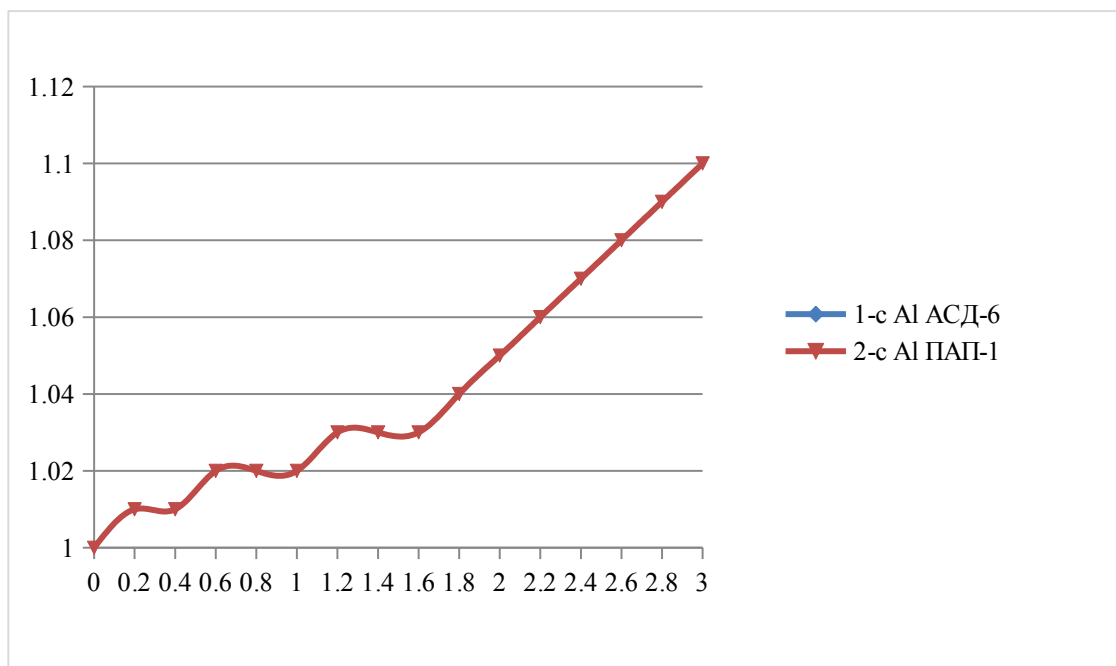


Рисунок 2 – Влияние добавки  $\text{SnCl}_2$  на коэффициент эффективности скорости горения.

Существенное влияние на скорости горения оказывает добавка катализатора только на скорость горения состава, содержащего металлическое горючее в виде алюминия марки ПАП-1. Использование  $\text{SnCl}_2$  в составах с алюминием АСД-6 не приводит к изменению скорости горения системы.

Проведены эксперименты с добавкой  $\text{SnCl}_2$  для составов содержащих различные окислители или их смесь, а также с разным горючим – связующим.

Порошок хлорида олова перед введением в смесь окислителя и связующего тщательно в течение 30 минут перемешивают с алюминием, а затем 30-40 минут перемешивают всю смесь. В таблице 5 приведен состав смесей горючего и скорости горения высокоэнергетической смесей без добавки хлорида олова и с добавкой.

Таблица 5 – Компонентный состав ВЭМ, влияние введения  $\text{SnCl}_2$  на скорость горения

№ п/п	Содержание компонентов, %					Сверх 100см	Скорость горения $\vartheta_0$ , мм/с	Скорость горения $\vartheta$ $\vartheta_{\text{ZnCl}_2}$ , мм/с	Коэффициент, К
	НА	НК	НМХ	СКДМ	Al	SnCl <sub>2</sub>			
1	64,0	-	-	21,0	15	-	2,0	-	1,5
2	64,0	-	-	21,0	15	2,0	-	3,0	-
3	32	32	-	21,0	15	-	2,8	-	-
4	32	32	-	21,0	15	2,0	-	4,3	1,5
5	36,9	-	36,9	11,2	15	-	2,5	-	-
6	36,9	-	36,9	11,2	15	2,0	-	2,7	1,5

Для определения влияния добавки SnCl<sub>2</sub> на горение высокоэнергетических систем на активном горючем проведены аналогичные эксперименты составов на активном горючем- связующем (полиуретан новый каучук марки НГУ) с использованием различных окислителей (НА,НК,НМК) и их смесей. В качестве металлического горючего использовалась алюминиевая пудра марки ПАП-1, содержание SnCl<sub>2</sub> 2% свыше 100% алюминиевой массы. Содержание алюминия в смеси 15%, коэффициент избытка окислителя 0,5. Плотность образцов 1,71-1,73.

В таблице 6 приведены скорости горения образцов и коэффициенты эффективности.

Таблица 6 – Скорость горения образцов ВЭМ с SnCl<sub>2</sub> на активном горючим–связующим.

Окислитель	$\vartheta_0$ мм/с	$\vartheta_{\text{ZnCl}_2}$ мм/с	К
НА	0,68	1,12	1,64
НК/НА	0,72	1,20	1,67
НМХ	0,75	1,41	1,87
НА/НМХ	0,78	1,34	1,72

Добавление SnCl<sub>2</sub> 2% в высокоэнергетическую смесь с активным горючим связующим приводит к увеличению скорости горения в 1,64±1,87 раз.

Содержание огарков для всех систем 8-10 %. Остаточное содержание алюминия в огарке 0.2- 0.6 %. Остаточный алюминий в огарке определялся волюметрическим методом. Данные РФА показали отсутствие во всех огарках нитридов алюминия.

Результаты экспериментов показали, что при горении высокоэнергетических составов, содержащих алюминий ПАП-1 в качестве металлического горючего, введение  $\text{SnCl}_2$  в количестве 2% свыше 100% от общей массы состава приводит к существенному повышению скорости горения при атмосферном давлении.

Эффект увеличения скорости горения при введении в состав ВЭМ хлорида олова может быть связан со следующими факторами. В работах [15,16] показано что процесс ультрадисперсного алюминия в воздухе (т.е. в кислородного-азотной газовой среде) протекает в две стадии – при температуре  $1200^\circ\text{C}$  на первой стадии и ( $1800-2400^\circ\text{C}$ ) на второй. В качестве одного из конечных продуктов обнаружена фаза нитрида алюминия, массовая доля которого превышала 40-50%. Образование значительного количества нитрида алюминия характерна образованием нитридов при горении порошков бора, кремния и титана [16]. Все эти вещества объединяет способность образовывать летучие субоксиды, которые, вероятно, выполняют роль интермедианатов при взаимодействии с азотом [17].

Реакция нитридообразования при горении протекает с соответствующим понижением теплового эффекта сгорания (для порошка алюминия – максимально на 281,3 кДж/моль по сравнению с тепловым эффектом образования оксидов) и температуры горения металлов (на 1300-1500К) по сравнению с адиабатической температурой.

Добавка хлорида олова предотвращает образование нитридов алюминия при горении высокоактивных алюминия марки ПАП-1 приводит к росту

тепловыделения при горении высокоэнергетических тепловых систем и для повышения энергетических характеристик.

Исследованы способы рецептурного регулирования скорости горения твердотопливных металлизированных высокоэнергетических композиций на основе нитрата аммония.

Использование фазостабилизированного нитрата аммония повышает реологические характеристики топлива в интервале эксплуатационных температур.

Использование алюминиевой пудры повышает энергетические характеристики топлива, снижает индукционный период зажигания топлива и температуру воспламенения, повышает скорость горения. Пластинчатая форма частиц алюминиевой пудры улучшает реологические свойства топливной массы.

Исследовано влияние катализаторов, модифицированного алюминия на скорость горения высокоэнергетических систем. на процесс шлакообразования и полноту сгорания алюминия. Исследованы факторы влияющие на реологические свойства топливных масс ,физико-химические свойства топливных зарядов. Исследованы характеристики топливных зарядов различного состава.

## **ВЫВОДЫ**

На основе проведенных экспериментов определены оптимальные составы высокоэнергетических систем. Установлено, что введение  $\text{SnCl}_2$  в количестве 2% свыше 100% от общей массы состава приводит к существенному повышению скорости горения при атмосферном давлении.

Добавление хлорида олова предотвращает образование нитридов алюминия при горении высокоактивных алюминия марки ПАП-1 и приводит к



росту тепловыделения при горении высокоэнергетических тепловых систем и для повышения энергетических характеристик.

Введение оксида кремния в состав высокоэнергетической системы увеличивает скорость горения состава содержащим алюминий 15% в смеси в 1,3 – 1,7 раза по отношению к базовому составу. Скорость горения топлива при введении в состав  $\text{SiO}_2$  тем, выше, чем выше содержание в составе топлива алюминия марки ПАП-1.

Введение  $\text{SiO}_2$  в состав топлива не содержащего металлическое горючее не влияет на скорость горения системы.

Установлено, что использование фазостабилизированного нитрата аммония повышает реологические характеристики топлива в интервале эксплуатационных температур.

Использование алюминиевой пудры повышает энергетические характеристики топлива, снижает индукционный период зажигания топлива и температуру воспламенения, повышает скорость горения.

Установлено, что использование фазостабилизированного нитрата аммония и алюминиевой пудры для получения высокоэнергетических повышают прочностные и реологические характеристики топливных зарядов.

Установлено, что замена алюминия АСД-6 на алюминий марки ПАП-1 увеличивает скорость горения композиции в 2,5-3 раза.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетические конденсированные системы краткий энциклопидический словарь. / М.: Янус-К 2000.596с.
2. Чулков А.З.Скворцов И.Д, Шур М.С. Процесс горения топлива в РДТТ/ Итоги науки и техники. Серия «Авиационные и ракетные двигатели» М.: ВИНТИ АН СССР, 1974. 218с.
3. Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива./ М.: Машиностроение.1984.248с.
4. Архинов В.А. Ашубаев А.К, Трофимов В.Ф.// Горение конденсированных веществ армированных элементами с эффектом памяти формы. Физика горения и взрыва. 1966.Т.32.№ 3.59-64с.
5. Мирон Д.Б, Иванов Д.А, Моногаров К.А, Муравьев Н.В. Механоактивация компонентов как способ повышения эффективности ЭКС./ Фундаментальные исследования 2018 №4. 36-40с.
6. СИНТЕЗ ТВЕРДЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ. Сейсенова А.Б., Акназаров С.Х., Juan Maria Gonzalez-Leal, Байракова О.С., ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ, №4 ТОМ 15, 2017 Г. 325-331 стр.
7. Шиндловский А.А. / Основы пиротехники. М.: Машиностроение 1970. 278с.
8. Порошок алюминиевый высокодисперсный АСД-1,АСД-4, АСД-6. Технические условия 48-5-226-87. Шелехов:-«ПМ»1987.
9. Архинов В.А, Коротких А.Г, Бондарчук С.С. и др. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия.// Горный журнал 2006.№4. 58-64с.

10. Архинов В.А, Ворожцов А.Б, Горбенко Т.И, и др. Способ регулирования скорости горения смесового твердого топлива //Патент РФ N 24338. N19.
11. Похил П.Ф, Беляев А.Ф, Фролов Ю.В, и др. Горение порошкообразных металлов в активных среда .М.: Наука , 1972 284с .
12. Гороновский И.Т, Назаренко Ю.П, Некряч Е.Ф. Краткий справочник химика. Киев: Наукова думка. 1974.98с.
13. Кофстад П. Высокотемпературное окисления металлов. М.: Мир 1969. 392с.
14. Попок В.Н. Горение высокоэнергетических композитов на основе нитрата аммония при атмосферном давлении// Ползуновский вестник N 4-1,2011. С164-168.
15. Громов А.А. Процесс нитридообразования при горении нанопорошков алюминия в воздухе и азот – кислородной газовой смеси.// Изв.вузов.физика.2006.N6. С52-56.
16. Громов А.А, Ильина А.П, Архинов В.А. и др. /Горение нанопорошков алюминия. Томск: Дельтаплан. 2008. 385с.
17. Громов А.А, Ильина А.П, Яблуковский Г.В. Влияние добавок на горение ультрадисперсного порошка алюминия и химическое связывание азота воздуха. // Физика горения и взрыва . 1996. Т 32. N2