

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК-МОДИФИКАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕВЫХ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ

© 2025 г. О. Г. Глотов^{1,2*}, Н. С. Белоусова^{1,2}

¹ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.02.2024

После доработки 24.03.2024

Принята в печать 22.04.2024

Исследовано влияние добавок-модификаторов TiB_2 , AlMgB_{14} , $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, NH_4BF_4 и $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ на параметры горения смесевых топлив на основе перхлората аммония ($\approx 60\%$), порошкообразного алюминия ($\approx 20\%$) и связующего типа метилполивинил-тетразол ($\approx 20\%$). Каждую добавку вводили в количестве $\approx 2\%$. Измерены скорости горения топлив и исследованы конденсированные продукты горения при давлении 0.35 МПа. Воздействие добавок оценивали по степени их влияния на скорость горения, массу, размер и неполноту сгорания агломератов. Наиболее действенными оказались добавки TiB_2 и AlMgB_{14} . Показана возможность регулирования указанных параметров горения посредством введения малых добавок в топливо и необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Ключевые слова: модельное смесевое топливо, алюминий, добавки, модификаторы горения, диборид титана, борид алюминия и магния, тетрафтороборат аммония, аммоний-титан фтористый, кальций фосфорнокислый 3-замещенный, скорость горения, агломерация, конденсированные продукты горения, методика отбора в жидкость, агломераты, оксидные частицы, гранулометрический состав, полнота сгорания.

DOI: 10.31857/S0207401X25010073

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие ракетной техники связано в том числе с совершенствованием топливных рецептур. Роль ракетного топлива заключается в генерации требуемого количества энергии и рабочего тела с заданной скоростью в процессе горения при определенных условиях. К настоящему времени известно множество эффективных горючих, окислителей и связующих [1–4], при этом особое место занимают смесевые топлива, содержащие в качестве горючего металлические микроразмерные частицы Al, Mg и др. [5–7]. Наибольшее распространение получил алюминий вследствие удачного сочетания таких качеств, как высокая теплота сгорания и плотность, безопасность обращения с порошком, безвредность продуктов горения, коммерческая доступность. Однако, для алюминия характерно явление агломерации [8], которое заключается в объединении и слиянии исходных частиц в волне горения в агломераты.

Агломерация обычно приводит к нежелательным последствиям — снижению полноты сгорания металла, накоплению шлаков в камере двигателя и другим. Поэтому поиск путей снижения агломерации — предмет множества экспериментальных исследований. Ниже перечислены основные факторы, которые влияют на агломерацию и горение алюминия в составе топлив.

Рецептурные факторы — содержание алюминия [9–11], гранулометрический состав компонентов [9, 12], природа связующего [13–16], присутствие нитраминов [17–19], нитрата аммония [20–23] или иных альтернативных окислителей [24–29]. Физические факторы — давление [30] и скорость горения [31]. При этом скорость горения зависит от давления и дисперсности перхлората аммония (ПХА) [11, 31], поэтому для снижения агломерации с одновременным удовлетворением других требований к топливу необходимо оптимизировать сложнейшую систему с многочисленными

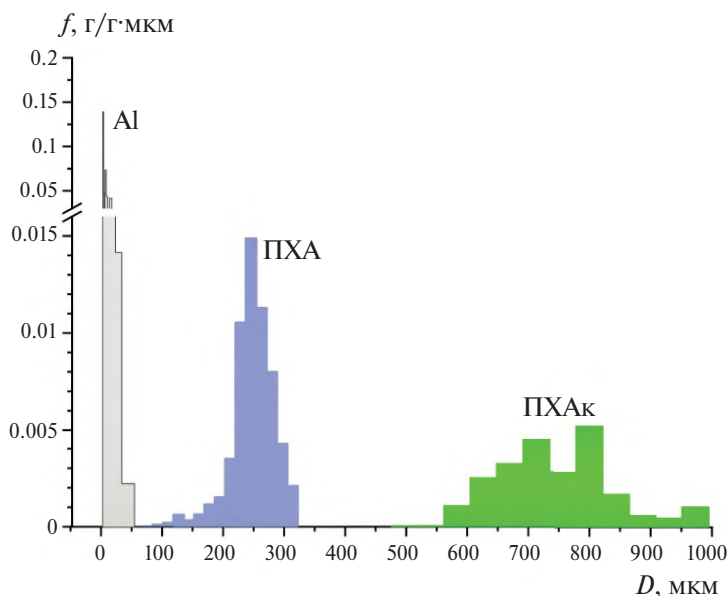


Рис. 1. Массовые функции распределения частиц алюминия, среднего и крупного перхлората аммония по размерам.

прямыми и обратными связями. Перспективные пути воздействия на поведение металла в волне горения, в том числе на агломерацию, следующие: модификация свойств металла в объеме, например, введение второго металла [32–34]; создание композитных частиц [35, 36]; модификация поверхности частицы либо покрывающего ее оксидного слоя [35, 37–44]; введение добавок в состав топлива [24, 45–47]. При этом введение нанодисперсного порошка алюминия [48, 49] можно рассматривать и как добавку в топливо, и как модификацию свойств алюминия. Общие представления о механизме действия добавок, введенных в топливо или непосредственно в частицы металла, изложены в работе [50].

Цель настоящей работы — в экспериментальной оценке влияния пяти добавок на агломерацию алюминия в типичной рецептуре топлива с ПХА и активным связующим, а также в проверке возможности достижения полезных эффектов с помощью введения добавок. Применительно к агломерации к таковым относятся снижение размеров и массы крупных частиц-агломератов, увеличение полноты сгорания металла и уменьшение размера мелких оксидных частиц. Работа имеет поисковый характер и выполнена с использованием упрощенной методики отбора продуктов горения. Более детальные исследования, в частности, механизмов действия добавок, имеет смысл проводить только в случае обнаружения требуемых эффектов.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ТОПЛИВА И ДОБАВКИ

Эксперименты проводили с неотвержденными модельными смесями, которые имели пастообразную консистенцию и содержали следующие компоненты: ПХА одной из двух фракций — крупный с размером частиц 500–630 мкм (ПХАк), или средний с размером частиц 180–250 мкм (ПХА); активное горючее-связующее — метилполивинил-тетразол (МПВТ) [20]; микродисперсный порошок алюминия марки АСД-4 (Al). Массовое соотношение компонентов ПХА/связующее/Al составляло 60/20/20 или 62/20/18. Процедура приготовления образцов топливной массы включала взвешивание компонентов на аналитических весах МВ 210-А с точностью 0.0001 г и их перемешивание вручную в бронзовой чашке фторопластовой лопаткой. При работе лопаткой действовали очень осторожно, чтобы не раскрошить частицы крупного ПХА. Типичная масса приготавливаемой порции топлива для исследования составляла ~5 г, что позволяло легко визуально контролировать однородность перемешивания.

Гранулометрические характеристики порошкообразных компонентов представлены в табл. 1 и на рис. 1 в виде нормированных функций плотности распределения относительной массы частиц по размерам. Нормировку проводили таким образом, чтобы площадь под кривой (масса) была равна единице.

Таблица 1. Средние размеры частиц порошкообразных компонентов топлив (в мкм)

Компонент	D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}
ПХАк	712	723	734	746
ПХА	221	232	242	249
Al	4.2	5.8	8.7	15

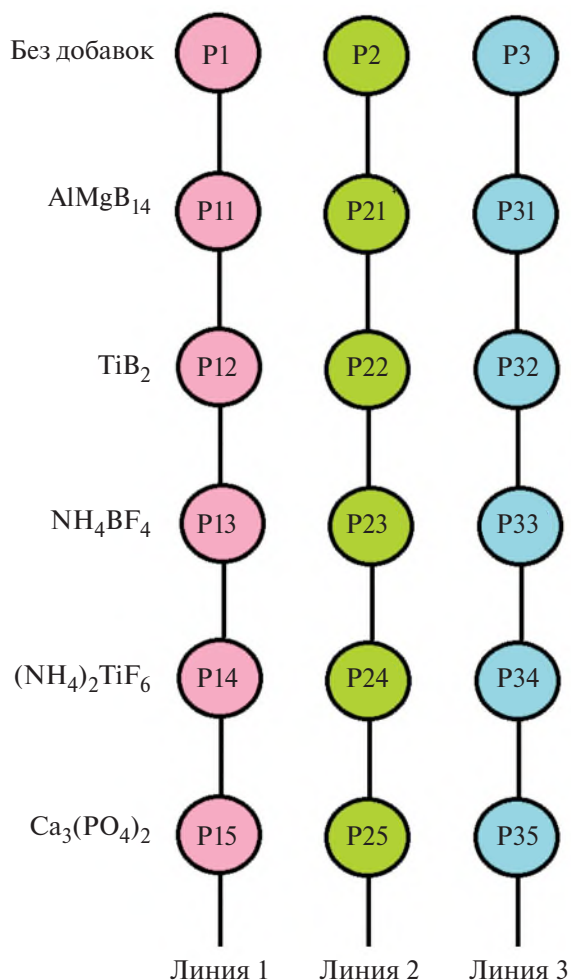


Рис. 2. Схема вариации состава топлив.

Средние размеры частиц порошков D_{mn} вычисляли по формуле

$$D_{mn} = \left[\left(\sum_{i=1}^k D_i^m N_i \right) / \left(\sum_{i=1}^k D_i^n N_i \right) \right]^{1/(m-n)}, \quad (1)$$

где m, n — целые числа, задающие порядок среднего размера, k — число размерных интервалов в гистограмме, N_i — число частиц в i -том интервале, D_i — середина i -го интервала. Здесь и далее расчетные значения средних диаметров приводим без округления.

Схема вариации составов топлив представлена на рис. 2. Имеются базовые топлива P1, P2 и P3.

Топливо P1 содержит 20% связующего, 20% Al и 60% ПХАк. Топливо P2 отличается размером частиц окислителя и содержит 20% связующего, 20% Al и 60% ПХА. Топливо P3 имеет пониженное содержание Al (18%), повышенное содержание ПХА (62%) и то же количество связующего (20%). Следуя данным работы [51], каждую добавку-модификатор вводили в базовое топливо в количестве около 2% (сверх 100%). Добавки: диборид титана TiB_2 , борид алюминия и магния $AlMgB_{14}$, аммоний-титан(IV) фтористый $(NH_4)_2TiF_6$, тетрафтороборат аммония NH_4BF_4 , кальций фосфорнокислый 3-замещенный $Ca_3(PO_4)_2$. Выбор добавок обусловлен наличием атомов “горючих” Al, Mg, B, Ti или атома F как окислителя и одновременно элемента, способного взаимодействовать с оксидной пленкой, покрывающей частицы алюминия. Соединение $Ca_3(PO_4)_2$ — условно инертное — использовано для сравнения. В дальнейшем будем говорить о трех “линиях” рецептур, получаемых из базовых топлив P1, P2 и P3 путем введения перечисленных добавок (рис. 2). Составы модельных топлив представлены в табл. 2.

3. ПРОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная методика основана на сжигании исследуемого образца топлива в малогабаритном сосуде высокого давления (минибомбе) при давлении 0.35 МПа в азоте. При этом проводится видеосъемка процесса горения через окна и отбор конденсированных продуктов горения (КПГ) в жидкость.

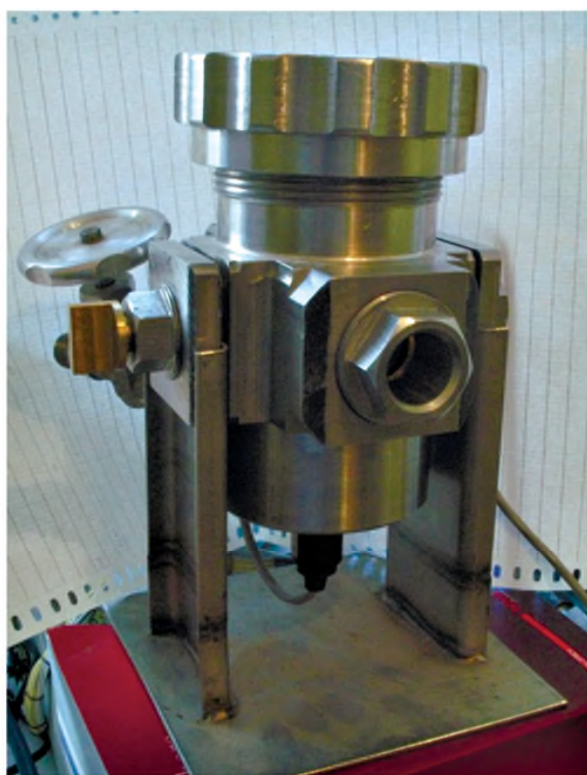
Вид сосуда высокого давления показан на рис. 3. Наружный диаметр корпуса — 90 мм, эффективный диаметр окон — 30 мм, рабочее давление — до 3 МПа, объем — 0.33 л.

Воспламенение образца производится с помощью нихромовой проволоки, нагреваемой электротоком. Под образцом устанавливается стакан с “замораживающей” жидкостью — дистиллированной водой. Диаметр стакана на 0.5 мм меньше внутреннего диаметра сосуда. Образец в виде пастообразной смеси помещен в стаканчик из оргстекла внутренним диаметром 5 мм и глубиной 5 мм и закреплен в сосуде так, чтобы факел горения был направлен вниз. Расстояние от поверхности образца до поверхности жидкости перед опытом составляло 1.5 см. Инертный газ (азот) подается из баллона, давление контролируется

Таблица 2. Компонентный состав (мас. %) исследованных топлив

Топливо	Связующее	Al	ПХАк	ПХА	AlMgB ₁₄	TiB ₂	NH ₄ BF ₄	(NH ₄) ₂ TiF ₆	Ca ₃ (PO ₄) ₂
P1	20	20	60	—	—	—	—	—	—
P11	20	20	60	—	2	—	—	—	—
P12	20	20	60	—	—	2	—	—	—
P13	20	20	60	—	—	—	2	—	—
P14	20	20	60	—	—	—	—	2	—
P15	20	20	60	—	—	—	—	—	2
P2	20	20	—	60	—	—	—	—	—
P21	20	20	—	60	1.6	—	—	—	—
P22	20	20	—	60	—	1.8	—	—	—
P23	20	20	—	60	—	—	2	—	—
P24	20	20	—	60	—	—	—	2.1	—
P25	20	20	—	60	—	—	—	—	2.5
P3	20	18	—	62	—	—	—	—	—
P31	20	18	—	62	2	—	—	—	—
P32	20	18	—	62	—	1.5	—	—	—
P33	20	18	—	62	—	—	2.4	—	—
P34	20	18	—	62	—	—	—	1.5	—
P35	20	18	—	62	—	—	—	—	2.2

Примечание. Добавки вводили в топливо сверх 100%.



Внешний вид сосуда



Верхняя крышка



Образец и проволока поджига

Рис. 3. Фотографии сосуда высокого давления (минибомбы) и его оснастки.

манометром. Процесс горения образца регистрируется с помощью видеокамеры. Вылетающие с поверхности образца горящие металлические ча-

стицы-агломераты при попадании в жидкость гаснут. Оксидные частицы в свободном объеме сосуда высокого давления после сгорания образца

Таблица 3. Оценка скорости и времени оседания частиц в газе

Диаметр частиц, мкм	Скорость оседания, мм/с	Число Re	Время оседания, с
10	11.2	0.026	5.8
5	2.8	0.0032	23
3	1	0.0007	65
2.5	0.7	0.004	92
2.2	0.54	0.0027	120
2	0.4	0.0026	163

при достаточно длительной выдержке оседают на поверхность жидкости. В табл. 3 представлены результаты оценки скорости и времени оседания частиц с плотностью 3.7 г/см^3 (оксид алюминия) в газе при давлении 0.35 МПа. Расчеты проведены с помощью “аэрозольного калькулятора” программы AeroCalc [52], для выбора времени выдержки. Дистанция оседания — 65 мм, что соответствует высоте свободного объема сосуда, равной расстоянию от поверхности жидкости до крышки. Время оседания определяли как отношение расстояния к скорости оседания. Скорость оседания сферических частиц диаметром 2.2 мкм и плотностью 3.7 г/см^3 составляет 0.54 мм/с. Дистанцию в 65 мм они преодолевают за 120 с. Газовзвесь выдерживали в сосуде в течение 5 мин, чтобы частицы размером более 2 мкм гарантированно успели осесть в жидкость.

Таким образом, анализ результатов проведенных экспериментов показал, что производится гашение и полный отбор агломератов, покидающих поверхность горения образца. Однако оксидные частицы, оседающие на поверхность жидкости, отбираются не полностью. Некоторое количество их размером менее 2 мкм выходит с газом при сбросе давления после опыта. В качестве характерного размера агломератов использовали “среднемассовый” D_{43} , а для оксидных частиц — “среднеповерхностный” d_{32} . Указанные размеры вычисляли по формуле (1).

4. ПРЕПАРИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ОТОБРАННЫХ ЧАСТИЦ КПП

После извлечения стаканчика, суспензию, находящуюся в нем, процеживали через проволочное сито с размером ячейки 80 мкм. Частицы размером более 80 мкм считали агломератами. Предполагается, что граничный размер D_L , разделяющий агломераты и оксидные частицы, за-

висит от рецептуры топлива и условий горения [53]. В литературе приводятся различные значения D_L . Например, в работах [54, 55] агломератами считали частицы крупнее 30 мкм, в работе [56] D_L полагали равным 49 мкм, в работе [17] размер D_L составлял 119 мкм. В настоящей работе размер $D_L = 80 \text{ мкм}$ принят как некоторое “универсальное” значение, оправданное также соображениями практического удобства — “мокрое” просеивание водной суспензии частиц через сито 80 мкм осуществляется достаточно легко. Осадок на сите высушивали при комнатной температуре, взвешивали и определяли безразмерную массу частиц-агломератов m_{80} как отношение массы частиц крупнее 80 мкм к массе образца топлива до опыта. Абсолютная погрешность определения величины m_{80} обычно не превышает 0.02.

Высушенные частицы-агломераты подвергали морфологическому, гранулометрическому и химическому анализам. Морфологию частиц исследовали под оптическим микроскопом МБС-10, оснащенным цифровой окулярной камерой DCM-300. Гранулометрический анализ проводили с помощью оптического проекционного микроскопа Amplival (Carl Zeiss Jena, Германия) и полуавтоматического 23-канального счетного устройства с мерными кружками на прозрачной шаблонной линейке [57, 58]. Абсолютная погрешность измерения диаметров частиц составляла $\pm 22 \text{ мкм}$. Неполноту сгорания агломератов определяли цериметрическим методом аналитической химии [59, 60] с использованием восстановительного числа RN , которое характеризует способность материала присоединять кислород, то есть окисляться. Мерой неполноты сгорания h служит отношение чисел RN после и до начала горения, т.е. $RN_{ср}$ для продуктов горения, и RN_{prop} для топлива. Восстановительное число для КПП, $RN_{ср}$ определяется с учетом массы агломератов следующим образом:

$$RN_{ср} = (RN \text{ для агломератов}) m_{80}. \quad (2)$$

Восстановительное число для топлива RN_{prop} рассчитывается как произведение определенного в результате химического анализа восстановительного числа для металлического горючего RN_{mf} , и доли металлического горючего m_{mf} в топливе:

$$RN_{prop} = RN_{mf} m_{mf}. \quad (3)$$

В итоге неполноту сгорания агломератов находим как соотношение выражений (2) и (3):

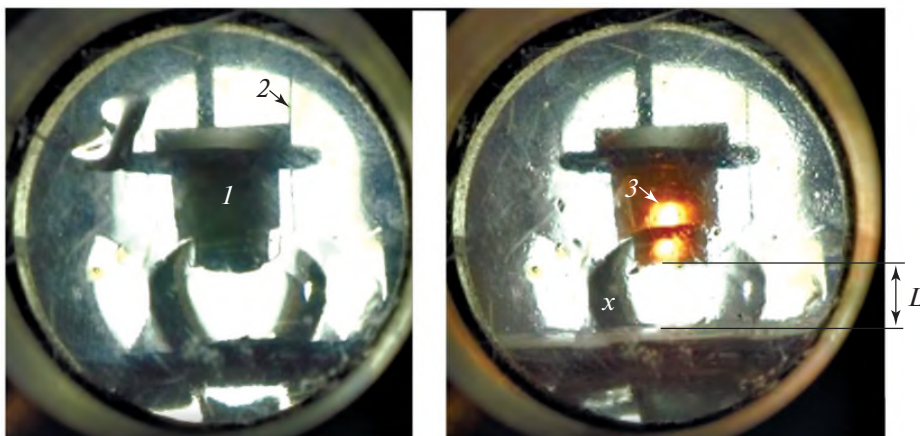


Рис. 4. Кадры видеозаписи процесса горения миниатюрного образца в минибомбе для отбора частиц–продуктов горения. Видеосъемка “на просвет” при освещении через тыльное окно минибомбы: левый кадр – вид до горения, правый кадр – в процессе горения: 1 – образец в стаканчике из оргстекла, закрепленный на кронштейне; 2 – проволока поджига; 3 – поверхность горения. Видно, что она сместилась от среза стаканчика вглубь (вверх); x – один из паразитных бликов-отражений, которые образуются на гранях стакана с замораживающей жидкостью; L – расстояние от образца до поверхности жидкости перед поджиганием образца.

$$\eta = RN_{ссп} / RN_{prop} \quad (4)$$

В таком определении неполнота сгорания может изменяться от 1 (ничего не сгорело) до 0 (все сгорело). Отношение измеренного числа RN_{mf} и его теоретического значения дает представление о “деградации” металлического горючего. Для использованного в экспериментах алюминия $RN = 10.14 \pm 0.28$ (усреднение по шести пробам), в то время как теоретическое значение для алюминия составляет 11.12 [60]. Величину, равную отношению $10.14/11.12 = 0.912$, или 91.2%, можно интерпретировать как содержание активного (неокисленного) металла в исходном алюминии. Значения m_{mf} составляют 0.2 для топлив линий 1 и 2 и 0.18 для топлив линии 3. Относительная погрешность определения h лежит в интервале 5–7%.

Проходящую через сито 80 мкм суспензию мелких оксидных частиц в воде анализировали на автоматическом гранулометре “Малверн-3600Е” (Великобритания). Режим: диапазон размеров – 0.5–118 мкм, обработка суспензии ультразвуком – в течение 30 с до измерения, механическая мешалка во время измерения включена. Каждую пробу анализировали дважды: измерение повторяли через 3 мин, результаты усредняли. Относительная погрешность измерения размеров – не более 10%.

По полученным эмпирическим функциям распределения определяли средние размеры мелких оксидных частиц d_{mn} и частиц-агломератов D_{mn} по формуле (1) в диапазонах 0.5–80 мкм и 80– D_{max}

соответственно. Здесь D_{max} – правая граница последнего гистограммного интервала в функции распределения агломератов.

Скорость горения образца (r , мм/с) рассчитывали как отношение длины образца ко времени его горения. Длина образца есть глубина стаканчика, равная 5 мм; время горения определяли путем обработки видеозаписей процесса горения. Абсолютная погрешность определения скорости горения – 0.1 мм/с. На рис. 4 приведены кадры видеозаписи процесса горения образца.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Скорость горения

На рис. 5 показано сравнение уровней скорости горения образцов топлив с добавками – модификаторами. Как видно из этого рисунка, добавки $AlMgB_{14}$ и TiB_2 повышают скорость горения, а добавки $Ca_3(PO_4)_2$, $(NH_4)_2TiF_6$, NH_4BF_4 в основном снижают ее по сравнению с соответствующими базовыми топливами. Здесь “в основном” использовано в связи с тем, что действие трех последних добавок неоднозначно для разных линий рецептур. Для топлив линии 3 добавки $Ca_3(PO_4)_2$, $(NH_4)_2TiF_6$, NH_4BF_4 слабо влияют на скорость горения, но все же незначительно (в пределах погрешности) повышают скорость.

5.2. Масса и размер агломератов

Масса агломератов характеризуется безразмерным параметром m_{80} (см. рис. 6). Из этого рисунка

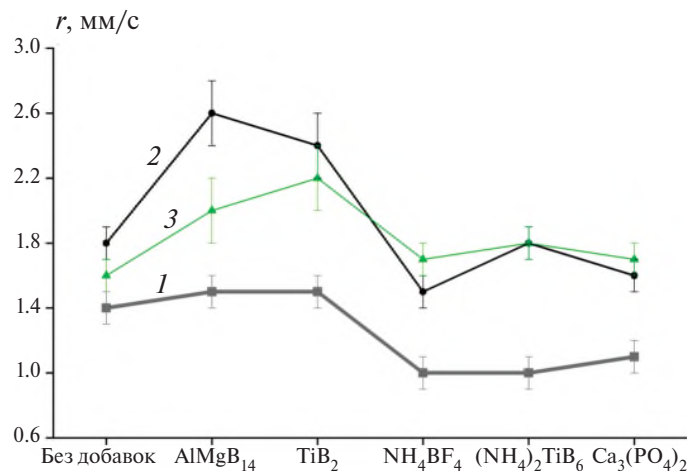


Рис. 5. Влияние добавок-модификаторов на скорости горения исследованных топлив при давлении 0.35 МПа: цифры 1, 2, 3 соответствуют топливам линий 1, 2, 3 (см. рис. 2).

Таблица 4. Средние размеры D_{mn} агломератов (в мкм) в исследуемых топливах

Топливо	D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}	D_{53}
P1	246	306	373	431	457
P11	225	252	279	303	214
P12	245	272	301	325	336
P13	268	304	341	374	390
P14	310	376	453	522	551
P15	281	316	355	399	422
P2	186	210	235	254	263
P21	234	267	300	326	338
P22	267	307	350	396	420
P23	197	219	240	258	265
P24	212	235	258	278	287
P25	214	235	257	274	282
P3	157	194	234	262	274
P31	135	160	188	217	232
P32	138	161	184	200	206
P33	183	209	236	257	267
P34	191	214	237	258	267
P35	171	193	216	232	239

можно видеть, что для топлив линий 1, 2 и 3 все исследованные добавки приводят к увеличению массы агломератов m_{80} , за исключением добавки $(\text{NH}_4)_2\text{TiB}_6$ для топлива линии 1.

В табл. 4 приведены средние размеры агломератов D_{mn} . На рис. 7 показано влияние добавок на средний размер агломератов D_{43} . В разных линиях топлив это влияние неоднозначно. Отметим слу-

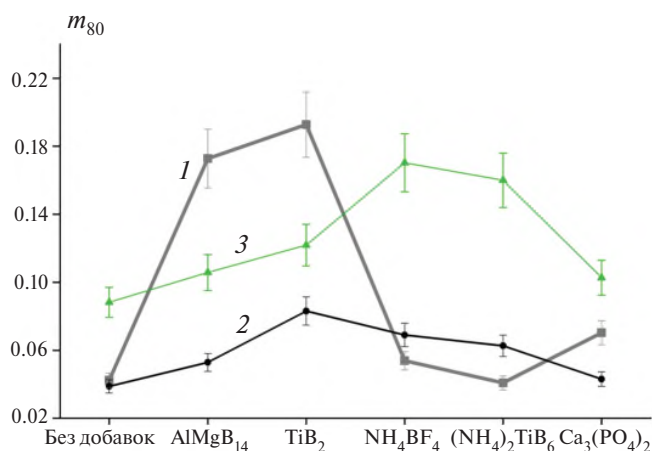


Рис. 6. Изменение безразмерной массы m_{80} частиц-агломератов: цифры 1, 2, 3 соответствуют топливам линий 1, 2, 3.

чай желаемого эффекта — снижения среднего размера D_{43} . Для топлив линии 1 добавки AlMgB₁₄ и TiB₂ приводят к заметному снижению D_{43} , добавки NH₄BF₄ и Ca₃(PO₄)₂ — к незначительному снижению. Для топлив линии 2 ни одна добавка не дала желаемого эффекта. Для топлив линии 3 добавки AlMgB₁₄ и TiB₂ приводят к снижению D_{43} .

Для сравнения был проведен расчет максимально возможного размера агломератов по модели тетраэдрических “карманов” [61], в которой параметры кармана и размер агломератов вычисляемы в предположении, что крупные частицы окислителя расположены в вершинах правильного тетраэдра. Внутренний объем тетраэдра заполнен смесью связующего и металла и образует карман, порождающий агломерат. Расчетные размеры агломератов для топлив линий 1, 2, 3 равны 341,

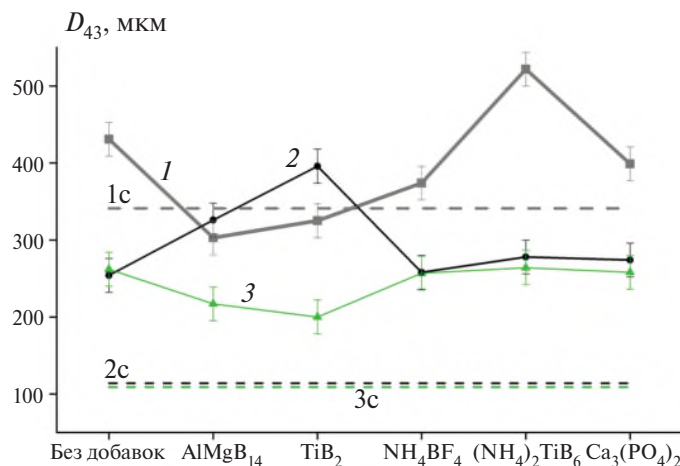


Рис. 7. Влияние добавок на средние размеры D_{43} частиц-агломератов: цифры 1, 2, 3 соответствуют топливам линий 1, 2, 3; горизонтальные штриховые линии 1с, 2с, 3с — расчет по модели [57] для топлив линий 1, 2, 3.

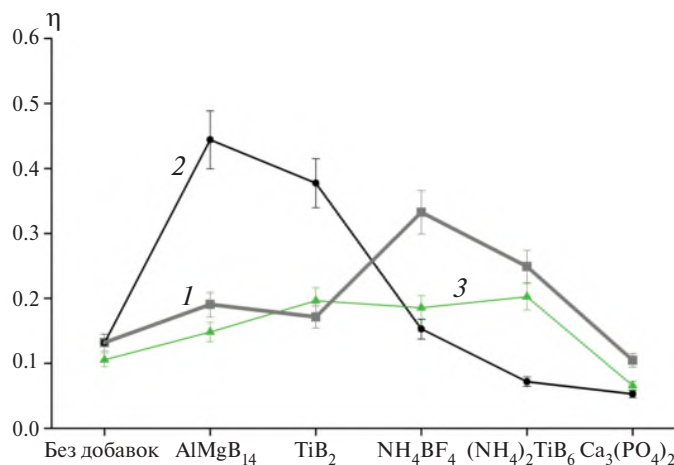


Рис. 8. Изменение неполноты сгорания η в зависимости от типа добавки: цифры 1, 2, 3 соответствуют топливам линий 1, 2, 3.

114 и 109 мкм соответственно. Как видно из рис. 7, экспериментальные значения для топлив линий 2 и 3 существенно превышают расчетные, что свидетельствует о “межкарманном” [11] механизме агломерации. Модель лучше работает для топлив линии 1 с частицами ПХА большего размера. В этом случае для трех из пяти рассматриваемых добавок относительны различия расчетных данных и экспериментальных значений D_{43} составляют 13, 5 и 9% для топлив P11, P12 и P13 соответственно, что указывает на подавление “межкарманной” агломерации добавками AlMgB₁₄, TiB₂, (NH₄)₂TiF₆.

5.3. Неполнота сгорания агломератов и размеры оксидных частиц

Зависимости неполноты сгорания агломератов в исследуемых топливах, h , от типа добавок пред-

ставлены на рис. 8. Анализ данных на рис. 8 показывает следующее. Для топлив линий 1 и 3 только добавка Ca₃(PO₄)₂ несколько снижает неполноту сгорания h . Для топлив линии 2 величину h снижают добавки (NH₄)₂TiF₆ и Ca₃(PO₄)₂.

На рис. 9 представлены результаты влияния добавок на размеры d_{32} мелких частиц. Химический анализ этих частиц не проводили, поскольку ожидалось, что они — преимущественно оксидные [14].

Средний размер мелких частиц d_{32} в большинстве случаев находится в диапазоне 2–3.5 мкм и слабо изменяется при введении добавок. “Выбросы” для топлив линии 1 (базового и топлива с добавкой (NH₄)₂TiF₆), вероятно, обусловлены особенностями препарирования частиц. На начальном этапе исследований мы не уделяли должного внимания строгому соблюдению времени

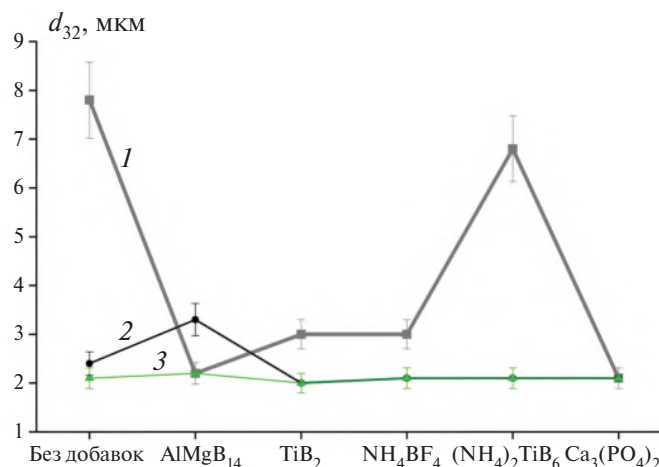


Рис. 9. Влияние добавок на размеры мелких частиц d_{32} : цифры кривых 1, 2, 3 соответствуют топливам линий 1, 2, 3.

Таблица 5. Основные параметры исследуемых топлив и влияние на них различных добавок

Топливо	m_{80}	Z_{m80}	r , мм/с	Z_r	D_{43} , мкм	Z_{D43}	η	Z_η	d_{32} , мкм	Z_{d32}
P1	0.088	0	1.4	0	431	0	0.13	0	7.8	0
P11	0.106	0.20	1.5	0.07	303	-0.30	0.19	0.46	2.2	-0.72
P12	0.122	0.38	1.5	0.07	325	-0.25	0.17	0.31	3	-0.62
P13	0.17	0.93	1	-0.29	374	-0.13	0.33	1.54	3	-0.62
P14	0.16	0.81	1	-0.29	522	0.21	0.24	0.85	6.8	-0.13
P15	0.103	0.16	1.1	-0.21	399	-0.07	0.10	-0.23	2.1	-0.73
P2	0.042	0	1.8	0	254	0	0.13	0	2.4	0
P21	0.173	3.08	2.6	0.44	326	0.28	0.44	2.38	3.3	0.38
P22	0.193	3.55	2.4	0.33	396	0.56	0.37	1.85	2	-0.17
P23	0.054	0.27	1.5	-0.17	258	0.02	0.15	0.15	2.1	-0.12
P24	0.041	-0.04	1.8	0	278	0.09	0.07	-0.46	2.1	-0.12
P25	0.07	0.66	1.6	-0.11	274	0.08	0.05	-0.62	2.1	-0.12
P3	0.039	0	1.6	0	262	0	0.10	0	2.1	0
P31	0.053	0.36	2	0.25	217	-0.17	0.14	0.40	2.2	0.05
P32	0.083	1.14	2.2	0.38	200	-0.24	0.19	0.90	2	-0.05
P33	0.069	0.78	1.7	0.06	257	-0.02	0.18	0.80	2.1	0
P34	0.063	0.62	1.8	0.12	232	-0.11	0.06	-0.40	2.1	0
P35	0.043	0.11	1.7	0.06	258	-0.02	0.2	1	2.1	0

Примечание. Погрешности величин: m_{80} — 0.02 (абс.), r — 0.1 мм/с (абс.), D_{43} — 22 мкм (абс.), η — 7% (отн.), d_{32} — 10% (отн.).

выдержки газозвеси в минибомбе. Недостаточная выдержка могла привести к “недоосаждению” сравнительно мелких частиц в жидкость, их последующей потере при выпуске газа из бомбы, и, как следствие, к завышенному значению среднего размера частиц, которые успели осесть в жидкость. Не принимая во внимание “выбросы”, отметим разнонаправленное влияние добавки AlMgB₁₄ — положительный эффект (уменьшение размера d_{32} по сравнению с условным “средним”

уровнем) в случае топлив линии 1, отрицательный — в случае топлив линии 2 и отсутствие эффекта для топлив линии 3.

В табл. 5 представлены основные параметры смесового топлива: безразмерная масса агломератов m_{80} , скорость горения r , средний размер агломератов D_{43} , неполнота сгорания агломератов η , средний размер мелких оксидных частиц d_{32} , а также “относительный эффект” Z , показывающий влияние добавки на каждый из рассматриваемых

Таблица 6. Оценка качественного влияния добавок на рассматриваемые параметры топлива

Добавка	Топливо	m_{80}	r	D_{43}	η	d_{32}	Топливо	m_{80}	r	D_{43}	η	d_{32}	Топливо	m_{80}	r	D_{43}	η	d_{32}	S
AlMgB ₁₄	P11	—	0	+	—	+	P21	—	+	—	—	—	P31	—	+	+	—	0	5
TiB ₂	P12	—	0	+	—	+	P22	—	+	—	—	+	P32	—	+	+	—	0	6
(NH ₄) ₂ TiF ₆	P13	—	—	+	—	+	P23	—	—	0	—	+	P33	—	0	0	—	0	3
NH ₄ BF ₄	P14	—	—	—	—	+	P24	0	0	0	+	+	P34	—	+	+	+	0	6
Ca ₃ (PO ₄) ₂	P15	—	—	+	+	+	P25	—	—	0	+	+	P35	—	0	0	—	0	5

Примечание. Положительные эффекты (отмечены “+”): снижение массы агломератов, повышение скорости горения, уменьшение размеров агломератов, понижение неполноты сгорания, снижение размера оксидных частиц.

параметров. Определим этот эффект для отдельного параметра p следующим образом:

$$Z_p = \frac{(p_{\text{топливо с добавкой}} - p_{\text{базовое топливо}})}{p_{\text{базовое топливо}}},$$

где $p - m_{80}, r, D_{43}, \eta$ или d_{32} .

Из данных этой таблицы следует, что:

1. Для топлив линий 1 и 3 исследованные добавки приводят к уменьшению среднего размера агломератов D_{43} , за исключением топлива P14 с добавкой (NH₄)₂TiF₆. Максимальный эффект уменьшения среднего D_{43} наблюдается для добавки AlMgB₁₄ и составляет $Z_{D_{43}} = -0.30$ (топливо P11). Также хорошие результаты дает добавка TiB₂: $Z_{D_{43}} = -0.25$ (топливо P12) и $Z_{D_{43}} = -0.24$ (топливо P32). Для топлив линии 2 ни одна добавка не приводит к уменьшению среднего размера агломератов.

2. Исследованные добавки приводят к увеличению массы агломератов в большинстве случаев, за исключением добавки (NH₄)₂TiF₆ при введении ее в базовое топливо P2. Однако и в этом случае эффект незначителен $-Z_{m_{80}} = -0.04$ для топлива P24.

3. Добавки AlMgB₁₄ и TiB₂ повышают скорость горения всех топлив. Добавки Ca₃(PO₄)₂, (NH₄)₂TiF₆, NH₄BF₄ повышают скорость горения только в топливах линии 3. Максимальный эффект увеличения скорости наблюдается в топливе P21 с добавкой AlMgB₁₄ и составляет $Z_r = 0.44$.

4. Для топлив линий 1 и 2 добавка Ca₃(PO₄)₂ снижает неполноту сгорания h : $Z_\eta = -0.23$ (топливо P15) и $Z_\eta = -0.62$ (топливо P25, и это — максимальный эффект). Для топлив линии 2 и 3 величину h снижает добавка (NH₄)₂TiF₆: $Z_\eta = -0.46$ (P24) и $Z_\eta = -0.40$ (P34).

5. Влияние добавок на размеры d_{32} мелких частиц исследовать не удалось. Как о тенденции, можно говорить о том, что при горении топлива

линии 1 с крупными частицами ПХА образуются более крупные частицы оксида по сравнению с топливами линий 2 и 3 с частицами ПХА средних размеров. Характерные размеры частиц d_{32} составляют примерно 3 и 2 мкм соответственно.

Таблица 6 суммирует полученные результаты. Знаки (+), (–) и (0) в ячейках обозначают положительный, отрицательный, отсутствие эффекта соответственно. Знак (0) также стоит в случаях слабого эффекта, когда его величина меньше погрешности рассматриваемого параметра. Ячейки таблицы с положительным эффектом затенены. Последняя колонка таблицы — параметр S (scores) — итоговое количество “баллов”, набранных той или иной добавкой, равный сумме значков “+” по строке табл. 6. Из данных таблицы видно, что наиболее эффективными по совокупности исследованных параметров оказались добавки NH₄BF₄, TiB₂ и AlMgB₁₄. Особенность вещества NH₄BF₄ — высокое содержание фтора. Молекула NH₄BF₄ содержит около 72% фтора, а в молекуле (NH₄)₂TiF₆ — примерно 58% фтора, что указывает на влияние элемента F на процессы, происходящие при горении. Особенность порошков TiB₂ и AlMgB₁₄ — высокая дисперсность. Оба порошка получены методом плазменной переконденсации [49], поэтому их частицы имеют в основном субмикронные размеры.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние добавок-модификаторов диборида титана TiB₂, борида алюминия и магния AlMgB₁₄, аммоний-титана(IV) фтористого (NH₄)₂TiF₆, тетрафторобората аммония NH₄BF₄, кальция фосфорнокислого 3-замещенного Ca₃(PO₄)₂ на параметры горения при давлении 0.35 МПа смесового топлива, состоящего из алюминия марки АСД-4 в качестве горючего (≈20%), перхлората аммония в качестве окислителя (≈60%) и активного связующего на основе МПВТ

(≈20%). Массовая доля каждой из добавок в топливе составляла около 2% (сверх 100%). В экспериментах были измерены скорости горения образцов топлив с использованием видеосъемки, также определены характеристики конденсированных продуктов горения методом гашения и отбора частиц в жидкость. Анализ отобранных частиц позволил установить массу, размер и неполноту сгорания алюминиевых агломератов крупнее 80 мкм, а также размеры мелких (2–80 мкм) оксидных частиц. Исследования показали, как именно каждая из перечисленных добавок воздействует на определяемые параметры. Влияние оценивали исходя из повышения скорости горения, снижения массы, размера и неполноты сгорания агломератов, а также снижения размера мелких частиц. Было замечено, что добавки сильнее влияют на топливо с крупными частицами ПХА (500–630 мкм), чем на топлива с частицами ПХА средних размеров (180–250 мкм). Сравнение исследованных добавок по убыванию совокупности зарегистрированных положительных эффектов показывает что, несмотря на отдельные положительные эффекты, ни одна из пяти добавок не дает одновременного значимого снижения как размера, так и массы агломератов (см. табл. 6). Вместе с тем проведенный анализ, хотя и базируется на ограниченном наборе экспериментальных данных (одно давление в 0.35 МПа, один тип связующего), показал принципиальную возможность влияния добавок на избранные параметры горения. Следовательно работу по поиску новых добавок, способных снизить интенсивность агломерации, необходимо продолжить. Перспективными представляются высокодисперсные порошки веществ с высоким содержанием фтора.

Авторы (ИХКГ СО РАН) благодарят В.Я. Ведяева, О.Н. Житницкую, П.Г. Корчемкину, А.В. Ластовку, И.В. Сорокина и Г.С. Суродина за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов.

Данная работа финансировалась за счет средств Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания (тема № FWGF-2021-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. акад. Жукова Б.П. М.: Янус-К, 2000.
2. Сарнер С. Химия ракетных топлив. Пер. с англ. М.: Мир, 1969.
3. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. М.: МО РФ, 1999.
4. Нуруллаев Э.М. Основные характеристики смесевых твердых топлив и области их применения. 2-е изд. М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.
5. Фролов Ю.В., Похил П.Ф., Логачев В.С. // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8. № 2. С. 213.
6. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
7. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Архипов В.А. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 41.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22030074>
8. Гладун В.Д., Фролов Ю.В., Кашипов Л.Я. Агломерация частиц порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем [Препринт]. Черноголовка: Ин-т хим. физики АН СССР, 1977.
9. Похил П.Ф., Мальцев В.М., Логачев В.С. и др. // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7. № 1. С. 51.
10. Фролов Ю.В., Никольский Б.Е. // Там же. 1983. Т. 19. № 5. С. 101.
11. Бабук В.А., Белов В.П., Ходосов В.В. и др. // Там же. 1985. Т. 21. № 3. С. 20.
12. Джараман К., Чакраварти С.Р., Сарати Р. // Там же. 2010. Т. 46. № 1. С. 26.
13. Combustion and detonation. Proc. 28th Intern. Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 1997. Report 75.
14. Zarko V.E., Glotov O.G. // Sci. Technol. Energetic Mater. 2013. V. 74. № 6. P. 139.
15. Лю Ю.Г., Тянь С., Инь Л. и др. // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 2. С. 71.
16. Бабук В.А., Куклин Д.И., Нарыжный С.Ю. и др. // Там же. 2023. Т. 59. № 2. С. 125.
17. Глотов О.Г. // Там же. 2006. Т. 42. № 4. С. 78.
18. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20030061>
19. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 34.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2201006X>
20. Горбенко Т.И. // Вестн. СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева. 2009. Т. 23. № 2. С. 173.
21. Попок В.Н., Хмелев В.Н. Смесевые конденсированные химические топлива на основе нитрата аммония. Принципы компоновки и свойства. Бийск: Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова, 2014.
22. Сакович Г.В., Архипов В.А., Ворожцов А.Б. и др. // Изв. Томского политехнического ун-та. 2009. Т. 314. № 3. С. 18.

23. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Ларионов Б.И. и др. // Хим. физика и мезоскопия (Ижевск). 2006. Т. 8. № 1. С. 53.
24. Гладун В.Д., Фролов Ю.В., Кашипов Л.Я. // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13. № 5. С. 705.
25. Попок В.Н., Вандель А.П., Колесников А.Ю. // Бутлеров. сооб. (Казань). 2013. Т. 36. № 11. С. 58.
26. Попок В.Н., Попок Н.И., Пивоваров Ю.А. // Там же. 2017. Т. 49. № 3. С. 147.
27. Liu X., Ao W., Liu H. et al. // Propellants Explos. Pyrotech. 2017. V. 42. № 3. P. 260.
28. Наур У.Р., Сивабалан Р., Гор Г.М. и др. // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 2. С. 3.
29. Lal S., Staples R.J., Shreeve J.M. // Chem. Eng. J. 2023. V. 468. P. 143737.
30. Бабук В.А., Белов В.П., Шелухин Г.Г. // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 3. С. 26.
31. Price E.W., Sigman R.K., Sambamurthi J.R. et al. Behavior of aluminum in solid propellant combustion. AFOSR-TR-82-0964. Atlanta (USA): Georgia Institute of Technology, 1982.
32. Брейтер Л.Л., Кашипов Л.Я., Мальцев В.М. и др. // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7. № 2. С. 222.
33. Aly Y., Schoenitz M., Dreizin E.L. // Combust. and Flame. 2013. V. 160. № 4. P. 835.
34. Ao W., Fan Z., Lu L. et al. // Ibid. 2020. V. 220. P. 288.
35. He W., Lyu J.Y., Tang D.Y. et al. // Ibid. V. 221. P. 441.
36. Долгобородов А.Ю. // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 102.
37. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. 2-е изд., испр. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
38. Глотов О.Г., Ягодников Д.А., Воробьев В.С. и др. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 3. С. 83.
39. Шевченко В.Г., Еселевич Д.А., Попов Н.А. и др. // Там же. 2018. Т. 54. № 1. С. 65.
40. Rosenband V., Gany A. // Intern. J. Energetic Mater. Chem. Propuls. 2007. V. 6. № 2. P. 143.
41. Shafirovich E., Bocanegra P.E., Chauveau C. et al. // Proc. Combust. Inst. 2005. V. 30. № 2. P. 2055.
42. Andrzejak T.A., Shafirovich E., Varma A. // Combust. and Flame. 2007. V. 150. № 1-2. P. 60.
43. Лебедева Е.А., Тутубалина И.Л., Вальцифер А. и др. // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 6. С. 41.
44. Lyu J.Y., Xu G., Zhang H. et al. // Fuel. 2024. V. 356. Article 129587.
45. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A. et al. // Combust. and Flame. 2017. V. 178. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.01.004>
46. Pang W.Q., De Luca L.T., Fan X.Z. et al. // Ibid. 2020. V. 220. P. 157.
47. Теджасви К., Рао В.В., ПидиСетти Ю. и др. // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 2. С. 82.
48. Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф. и др. // Там же. 2005. Т. 41. № 6. С. 80.
49. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. М.: Торус Пресс, 2015.
50. Буланин Ф.К., Сидоров А.Е., Полетаев Н.И. и др. // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 2. С. 68.
51. Ромоданова Л.Д., Похил П.Ф. // Там же. 1973. Т. 9. № 2. С. 230.
52. Aerosol Calculator Program; <http://www.cheresources.com/che-links/content/particle-technology/aerosol-calculator-program>. 2012. URL: <http://cires.colorado.edu/jimenez-group/Reference/aerocalc.zip> (дата обращения: 22.03.2024).
53. Глотов О.Г., Зарко В.Е., Карасев В.В. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 1. С. 161.
54. Babuk V.A., Vasilyev V.A., Malakhov M.S. // J. Propul. Power. 1999. V. 15. № 6. P. 783.
55. Babuk V.A., Vassilyev V.A., Sviridov V.V. // Combust. Sci. Technol. 2001. V. 163. P. 261.
56. Самбамурти Д.К., Прайс Е.В., Сигмен Р.К. // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника (Пермь). 1985. Т. 3. № 1. С. 65.
57. Куценогий К.П. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ИХКиГ, 1970.
58. Градус Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М.: Химия, 1979.
59. Fedotova T.D., Glotov O.G., Zarko V.E. // Propellants Explos. Pyrotech. 2007. V. 32. № 2. P. 160.
60. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G. et al. Boron-based fuel-rich propellant: properties, combustion, and technology aspects. Boca Raton (USA): CRC Press, 2019. P. 323.
61. Глотов О.Г., Сорокин И.В., Черемисин А.А. // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59. № 6. С. 91.

EFFECT OF ADDITIVE MODIFIERS ON THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE ALUMINIZED PROPELLANTS

O. G. Glotov^{1, 2*}, N. S. Belousova^{1, 2}

¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*E-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

We studied the effect of modifier additives TiB_2 , AlMgB_{14} , $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, NH_4BF_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ on the combustion parameters of composite propellants based on aluminum powder as a fuel (about 20% wt.), ammonium perchlorate as an oxidizer (about 60% wt.), and energetic binder (MPVT about 20% wt.). Additives were introduced in an amount of about 2%. The burning rates of propellants were measured and condensed combustion products were studied at a pressure of 0.35 MPa. The effect of additives was assessed using the following parameters: increasing the burning rate, reducing combustion incompleteness, mass and size of agglomerates. The most effective additives were NH_4BF_4 and TiB_2 . Conclusions are drawn about the prospects of using the studied additives to obtain the required combustion parameters.

Keywords: composite propellants, aluminum, additives, combustion modifiers, titanium diboride, aluminum-magnesium boride, ammonium tetrafluoroborate, ammonium-titanium fluoride, 3-substituted calcium phosphate, combustion rate, agglomeration, condensed combustion products, method of selection into liquid, agglomerates, oxide particles, particle size distribution, completeness of combustion.

REFERENCES

1. B.P. Zhukov, editor. *Energy condensing systems. Brief Encyclopedic Dictionary*. (Yanus-K, Moscow, 2000). [In Russian].
2. S.F. Sarnier. *Propellant Chemistry*. (New York, 1966).
3. V.I. Tsutsuran, N.V. Petrukhin, Gusev S.A. *Military-technical analysis of the state and prospects for the development of rocket fuels*. (MO RF, Moscow, 1999). [In Russian].
4. E.M. Nurullayev *Main characteristics of mixed solid fuels and areas of their application. 2nd ed.* (Infra-Inzheneriya, Moscow, Vologda, 2021). [In Russian].
5. Yu.V. Frolov, P.F. Pokhil, V.S. Logachev. *Combust Explos Shock Waves*. **8**, 2, 168. (1972).
6. A.G. Korotkikh, I.V. Sorokin, E.A. Selikhova, V.A. Arkhipov. *Russ. J. Phys. Chem. B*. **14**, 4, 600. (2020). <https://doi.org/10.1134/S1990793120040089>
7. A.G. Korotkikh, I.V. Sorokin, V.A. Arkhipov. *Russ. J. Phys. Chem. B*. **16**, 2, 259. (2022). <https://doi.org/10.1134/S1990793122020075>
8. V.D. Gladun, Yu.V. Frolov et al. *Agglomeration of a part of powdered metal during combustion of mixed condensed systems* [preprint]. (Institut khimicheskoy fiziki AN SSSR, Chernogolovka, 1977). [In Russian].
9. P.F. Pokhil, V.M. Maltsev, V.S. Logachev et al. *Combust Explos Shock Waves*. **7**, 1, 43 (1971).
10. Yu.V. Frolov, B.E. Nikolsky. *Combust Explos Shock Waves*. **19**, 5, 625 (1983).
11. V.A. Babuk, V.P. Belov, V.V. Khodosov et al. *Combust Explos Shock Waves*. **21**, 3, 287 (1985).
12. K. Jaraman, S.R. Chakravarthy, R. Sarathi. *Combust Explos Shock Waves*. **46**, 1, 21 (2010).
13. O.G. Glotov, V.E. Zarko V.V. Karasev et al. *Comb. and detonation. 28th International Annual Conference of ICT*. (Karlsruhe, Germany, 1997), Report **75**.
14. V.E. Zarko, O.G. Glotov. *Science and Tech. of Ener. Materials*. **74**, 6, 139 (2013).
15. Y.G. Liu, X. Tian, L. Yin et al. *Combust Explos Shock Waves*. **58**, 2, 190 (2022).
16. V.A. Babuk, D.I. Kuklin, S.Yu. Naryzhny et al. *Combust Explos Shock Waves*. **59**, 2, 236 (2023).
17. O.G. Glotov. *Combust Explos Shock Waves*. **42**, 4, 436 (2006).
18. I. Yu. Gudkova, I. N. Zyuzin, D.B. Lempert, *Russ. J. Phys. Chem. B*. **14**, 2, 302. (2020). <https://doi.org/10.1134/S1990793122010067>
19. I.Yu. Gudkova, I.N. Zyuzin, D.B. Lempert. *Russ. J. Phys. Chem. B*. **16**, 1, 58. (2022). <https://doi.org/10.1134/S1990793120020062>
20. T.I. Gorbenko, *Vestnik SibSAU im. M.F. Reshetneva*. **23**, 2, 173 (2009). [In Russian].
21. V.N. Popok, V.N. Khmelev. *Mixed condensed chemical fuels based on ammonium nitrate. Principles of layout and properties*. (Izd-vo Altayskogo gos. tekhnicheskogo un-ta im. I. I. Polzunova, Biysk, 2014). [In Russian].
22. G.V. Sakovich, V.A. Arkhipov, A.B. Vorozhtsov et al., *Izvestiya TGU*. **314**, 3, 18 (2009). [In Russian]
23. G.Ya. Pavlovets, V.Yu. Meleshko, B.I. Larionov et al. *Khim. fizika i mezoskopiya*. **8**, 1, 53 (2006). [In Russian].
24. V.D. Gladun, Yu.V. Frolov, L.Ya. Kashporov, *Combust Explos Shock Waves*. **13**, 5, 596 (1977).
25. V.N. Popok, A.P. Vandel, A.Yu. Kolesnikov. *Butlerovskiyee soobshcheniya*. **36**, 11, 58 (2013). [In Russian].
26. V.N. Popok, N.I. Popok, Yu.A. Pivovarov. *Butlerovskiyee soobshcheniya*. **49**, 15 (2017). [In Russian].

27. X. Liu, W. Ao, H. Liu et al. *Propellants, Explos., Pyrotech.* **42**, 3, 260 (2017).
28. U.R. Nair, R. Sivabalan, Gore G.M. et al. *Combust Explos Shock Waves*. **41**, 2, 121 (2005).
29. S. Lal, R.J. Staples, J.M. Shreeve, *Chem. Eng. J.* **468**, 143737, (2023).
30. V.A. Babuk, V.P. Belov, G.G. Shelukhin. *Combust Explos Shock Waves*. **17**, 3, 264 (1981).
31. E.W. Price, R.K. Sigman, J.R. Sambamurthi et al. *Behavior of aluminum in solid propellant combustion*. (AFOSR-TR-82-0964, Georgia Institute of Technology, 1982).
32. L.L. Breiter, L.Ya. Kashporov, V.M. Maltsev et al. *Combust Explos Shock Waves*. **7**, 2, 186 (1971).
33. Y. Aly, M. Schoenitz, E.L. Dreizin. *Comb. Flame*. **160**, 835 (2013).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>
34. W. Ao, Z. Fan, L. Lu et al. *Comb. Flame*. **220**, 288 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.07.004>.
35. W. He, J.Y. Lyu, D.Y. Tang et al. *Comb. Flame*. **221**, 441 (2020).
36. A.Yu. Dolgoborodov. *Combust Explos Shock Waves*. **51**, 1, 86 (2015).
37. D.A. Yagodnikov. *Ignition and combustion of powdered metals in gas-dispersed media*. (MG TU im. N.E. Bauman, Moscow, 2018). [In Russian].
38. O.G. Glotov, D.A. Yagodnikov, V.S. Vorobyov et al. *Combust Explos Shock Waves*. **43**, 3, 320 (2007).
39. V.G. Shevchenko, D.A. Eselevich, N.A. Popov et al. *Combust Explos Shock Waves*. **54**, 1, 58 (2018).
40. V. Rosenband, A. Gany Intern. *J. Energetic Mater. Chem. Propuls.* **6**, 2, 143 (2007).
41. E. Shafirovich, P.E. Bocanegra, C. Chanveau et al. *Proc Combust Inst.* **30**, 2, 2055 (2005).
42. T.A. Andrzejak, E. Shafirovich, A. Varma. *Combust. and Flame*. **150**, 60 (2007).
43. E.A. Lebedeva, I.L. Tutubalina, A. Valtsifer et al. *Combust Explos Shock Waves*. **48**, 6, 694 (2012).
44. J.Y. Lyu, G. Xu, H. Zhang et al. *Fuel*. **356**, 129587 (2024).
45. A.G. Korotkikh, O.G. Glotov, V.A. Arkhipov et al. *Combust. Flame*. **178**, 195 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.01.004>
46. W.Q. Pang, L.T. DeLuca, X.Z. Fan et al. *Combust. Flame*. **220**, 157 (2020).
47. K. Tejasvi, V.V. Rao, Y. PydiSetty et al. *Combust Explos Shock Waves*. **57**, 2, 203 (2021).
48. L.T. DeLuca, L. Galfetti, F. Severini et al. *Combust Explos Shock Waves*. **41**, 6, 680 (2005).
49. S.H.L. Guseynov, S.G. Fedorov. *Nanopowders of aluminum, boron, aluminum and silicon borides in high-energy materials*. (Torus Press, Moscow, 2015). [In Russian].
50. F.K. Bulanin, A.E. Sidorov, N.I. Poletaev et al. *Combust Explos Shock Waves*. **57**, 2, 190 (2021).
51. L.D. Romodanova, P.F. Pokhil. *Combust Explos. Shock Waves*. **9**, 2, 195 (1973).
52. Aerosol Calculator Program // <http://www.cheresources.com/che-links/content/particle-technology/aerosol-calculator-program>. 2012. URL: <http://cires.colorado.edu/jimenez-group/Reference/aerocalc.zip> (дата обращения: 22.03.2024).
53. O.G. Glotov, V.E. Zarko, V.V. Karasev. *Combust Explos Shock Waves*. **36**, 146 (2000).
54. V.A. Babuk, V.A. Vasilyev, M.S. Malachov. *J. Propul. Power*. **15**, 6, 783 (1999).
55. V.A. Babuk, V.A. Vassilyev, V.V. Sviridov. *Combust Sci. Technol.* **163**, 261 (2001).
56. J.K. Sambamurthi, E.W. Price, R.K. Sigman. *AIAA Journal*, **22**, 8, 1132 (1984).
57. K. P. Kutsenogii. *Candidate of dissertation tech. Sci.* (Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 1970). [In Russian].
58. L.Ya. Gradus. *A Guide to Dispersion Analysis Microscopy*. (Khimiya, Moscow, 1979). [In Russian]
59. T.D. Fedotova, O.G. Glotov, V.E. Zarko. *Propellants, Explos. Pyrotech.* **32**, 2, 160 (2007).
60. W. Pang, L.T. De Luca, X. Fan et al. *Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects*. (CRC Press, 2019).
61. O.G. Glotov, I.V. Sorokin, A.A. Cheremisin. *Combust Explos Shock Waves*. **59**, 6, 752 (2023).