

УДК 536.46:629.194.632.1

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ Al/V, Ti/V И Fe/V НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

И. В. Сорокин¹, А. Г. Коротких^{2,3}

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск, sorokin@kinetics.nsc.ru

²Томский политехнический университет, 634050 Томск, korotkikh@tpu.ru

³Томский государственный университет, 634050 Томск

Представлены характеристики зажигания и горения высокоэнергетического материала (ВЭМ), содержащего перхлорат аммония, бутадиеновый каучук и смесь ультрадисперсных порошков (УДП) алюминия, титана или железа с аморфным бором. На экспериментальных стендах с использованием CO₂-лазера и бомбы постоянного давления измерены время задержки зажигания и скорость горения ВЭМ при варьировании плотности теплового потока и давления в камере. Показано, что замещение в ВЭМ аморфного бора на УДП Al/V, Ti/V или Fe/V приводит к снижению времени прогрева и момента появления пламени на поверхности топлива, благодаря повышению скорости реагирования и снижению температуры окисления указанных смесей УДП на поверхности реакционного слоя. При этом скорость горения ВЭМ с Me/V при избыточных давлениях существенно повышается (до 240 % для Al/V-ВЭМ и до 120 % для Ti/V-ВЭМ при давлении 5.0 МПа).

Ключевые слова: высокоэнергетический материал, аморфный бор, энергоемкое металлическое горючее, окисление, время задержки зажигания, скорость горения.

DOI 10.15372/FGV2022.9262

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики зажигания и горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) имеют значение в решении ряда практических задач, связанных с оценкой взрывобезопасности, расчетом переходных процессов в энергоустановках различного назначения (ракетно-космические технологии, средства вооружения, пиротехника). Повышение характеристик горения возможно при введении в ВЭМ катализаторов горения, порошковых систем различных металлов или их оксидов [1–6]. Увеличения теплоты сгорания и снижения затрат энергии на зажигание ВЭМ можно достичь при использовании энергоемких борсодержащих дисперсных горючих (бор, бориды металлов) [5, 7, 8].

Закономерности горения отдельных борсо-

держащих частиц или дисперсных горючих с различными добавками оксидов металлов изучались в ряде публикаций [9–18]. Известно, что при окислении бора на поверхности частиц формируется жидкий оксидный слой, который замедляет скорость химических реакций с ядром бора, способствует образованию крупных частиц-агломератов в камере сгорания и приводит к неполному их сгоранию [9, 13]. Добавки различных металлов (Al, Cu, Mg, Fe, Ti, Zr) и оксидов металлов (Al₂O₃, Bi₂O₃, CeO₂, CuO, Fe₂O₃ и MgO) способны улучшить характеристики воспламенения и горения бора в окислительной среде [3, 4].

Применение ультрадисперсных металлов в ВЭМ обусловлено рядом их преимуществ [19–21], которые приводят к повышению реакционной способности и скорости горения топливных композиций. Это, в частности, высокая удельная площадь поверхности частиц и скорость химического взаимодействия с окислителем, относительно низкие температуры плавления и испарения, оптические свойства, обеспечивающие высокую поглощающую способность, высокая скорость прогрева наноразмер-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00588).

Доложено на 10-й Международной конференции им. В. В. Воеводского «Химия и физика элементарных химических процессов», 5–9 сентября 2022 г., Новосибирск.

© Сорокин И. В., Коротких А. Г., 2023.

ных частиц, имеющих небольшую массу и объем. Недостатком высокодисперсных металлов может быть повышенная агломерация на поверхности горения топлив или спекание частиц.

Целью работы является установление влияния энергоемких ультрадисперсных металлических горючих алюминий/бор, железо/бор и титан/бор на характеристики зажигания и горения модельного состава ВЭМ на основе твердого окислителя и полимерного горючесвязующего вещества.

1. ИСХОДНЫЕ ОБРАЗЦЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В изучении характеристик зажигания и горения металлизированных топливных композиций использовались цилиндрические образцы ВЭМ, содержащие перхлорат аммония (ПХА) двух фракций с размером частиц менее 50 мкм (3/5 массовой доли) и 160 ÷ 315 мкм (2/5 массовой доли) в количестве 64.6 %, бутадиеновый каучук марки СКДМ-80 — 19.7 % и энергоемкое металлическое горючее — 15.7 %. Образцы ВЭМ изготавливались методом последовательного перемешивания дисперсных компонентов (ПХА, металлического горючего) и полимерного связующего с дальнейшим пресованием и полимеризацией в сушильном шкафу при температуре 70 °С. Готовые цилиндрические образцы ВЭМ плотностью 1.68 ÷ 1.73 г/см³ имели диаметр 10 мм и высоту 30 мм.

В качестве энергоемкого металлического горючего использовались механические смеси ультрадисперсных порошков (УДП) с массовым соотношением Al/B 55.5/44.5 %, Ti/B 68.9/31.1 % и Fe/B 83.7/16.3 %. Данные соотношения металла с бором соответствуют фазово-

му составу диборидов алюминия AlB₂ и титана TiB₂, бориду железа FeB (без учета исходного оксида металла в порошке). Для приготовления смеси УДП использовался алюминий марки Alex, титан или железо, полученные методом электрического взрыва проводников (ООО «Передовые порошковые технологии», Россия) и аморфный бор марки Б-99А. УДП Alex и В хранились на воздухе, а УДП с титаном и железом — в жидком гексане. Микрофотографии УДП металлов и бора, полученные с применением электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU, представлены на рис. 1. В табл. 1 приведены среднесчетный диаметр d , удельная площадь поверхности S_{sp} частиц и содержание активного металла C_a порошков.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для определения реакционной способности и характеристик окисления УДП Me/B при нагреве в окислительной среде применялся термоанализатор STA 449 F3 Jupiter («Netzsch», Германия). Керамический Al₂O₃-тигель с навеской $\approx 6 \div 8$ мг УДП Me/B помещался в нагревательную печь, в которой образец нагревался с постоянной скоростью 10 °С/мин до температуры 1 200 °С. Объемный расход воздуха в печи составлял 150 мл/мин. В ходе измерения регистрировались масса и температура образца, удельный тепловой поток при наличии экзо- и эндотермических реакций от времени нагрева в печи.

Измерение характеристик зажигания образцов ВЭМ-Me/B диаметром 10 мм и высотой 5 мм осуществлялось на экспериментальном стенде, в котором в качестве внешнего источника нагрева использовался непрерывный СО₂-лазер с регулируемой мощностью от 7 до 200 Вт. Описание и принцип работы экспериментальной установки подробно изложены в [7, 22]. Время задержки зажигания ВЭМ определяли по разности электрических сигналов от фотодиодов, регистрирующих времена начала нагрева образца ВЭМ и появления зоны пламени на поверхности образца.

Измерение стационарной скорости горения образцов ВЭМ-Me/B диаметром 10 мм и высотой 30 мм при избыточных давлениях 0.5 ÷ 5.0 МПа проводилось методом сгорающих проволочек в бомбе постоянного давления в среде азота. Перед опытом боковая поверхность

Таблица 1

Параметры порошковых систем
(данные производителя)

Порошок	d , нм	S_{sp} , м ² /г	C_a , %
Alex	90 ÷ 110	15.5	90.0
Fe	90 ÷ 110	7.7	92.0
Ti	80 ÷ 110	13.8	93.8
B	210 ÷ 240	8.6	99.5

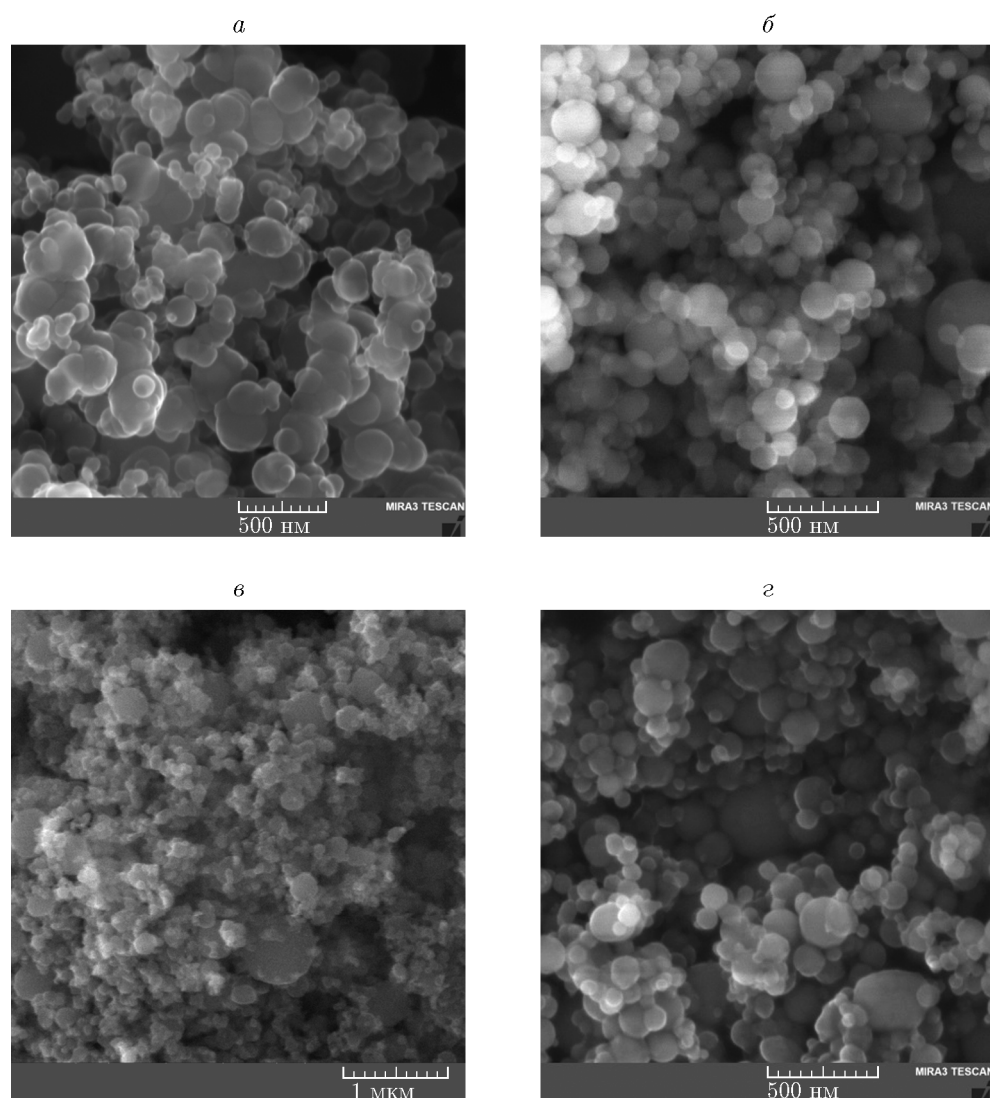


Рис. 1. Микрофотографии УДП аморфного бора (*а*), алюминия (*б*), титана (*в*) и железа (*з*)

цилиндрических образцов ВЭМ бронировалась двойным слоем изоляционной ленты. Горение и отток продуктов сгорания осуществлялись с торцевой поверхности образца ВЭМ.

Конструкция бомбы постоянного давления представлена на рис. 2. Образец ВЭМ (10) крепился на регулируемом держателе (12), размещенном на нижней пластине крышки. Регистрирующие горение проволочки (9), установленные на фиксированной высоте в образце (10), соединялись с внутренними (8) и внешними (3) электрическими контактами. Держатель (12) с внутренней крышкой-держателем (1) помещался в герметичный сосуд (14) и фиксировался с помощью внешней крышки (13) с уплотнительным кольцом (4). Через впускной

патрубок (15) осуществлялись откачка воздуха и подача азота из баллона до необходимого уровня давления. Давление в корпусе контролировалось манометром (16). Образец ВЭМ воспламенялся при подаче через трансформатор электрического тока на нихромовую спираль (7). Движение зоны пламени происходило вдоль оси образца с оттоком продуктов сгорания от торцевой поверхности ВЭМ. Время горения при фиксированной высоте образца топлива регистрировалось на осциллографе по разности электрических сигналов от перегорающих проволочек при прохождении через них зоны пламени.

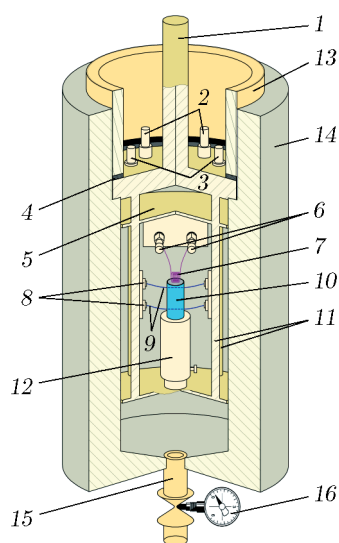


Рис. 2. Конструкция бомбы постоянного давления:

1 — внутренняя крышка-держатель, 2, 6 — выводы контактов электроподжига, 3, 8 — контакты проволоки регистрации, 4 — уплотнительное кольцо, 5 — защитный диск, 7 — спираль поджига, 9 — проволоки регистрации горения, 10 — образец топлива в бронировке, 11 — спицы крепления, 12 — регулируемый держатель образца, 13 — внешняя крышка, 14 — корпус бомбы, 15 — впускной/выпускной вентиль, 16 — манометр

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Характеристики окисления УДП Me/V

По данным измерения массы образцов УДП Me/V и удельного теплового потока в зависимости от температуры нагрева в печи определяли значения характерных температур начала (T_{on}) и интенсивного (T_{int}) окисления, диапазоны температур ΔT , соответствующие максимальной скорости изменения массы, и суммарного выделившегося тепла Q_p на единицу массы образца (табл. 2). Для установления диапазона ΔT определяли значения температур, при которых отклонение от максимального значения скорости изменения массы образца не превышало 10 %.

Окисление частиц аморфного бора на воздухе начинается при 560°C в период плавления покрытия из оксида B_2O_3 и диффузии кислорода. Более интенсивное окисление бора протекает в широком диапазоне температур $\Delta T = 655 \div 735^\circ\text{C}$, благодаря экзотермическим реакциям твердого ядра бора с диффундирующим кислородом и жидкой оксидной оболочкой.

Таблица 2

Характеристики окисления при нагреве УДП Me/V

Порошок Me	$T_{on}, ^\circ\text{C}$	$T_{int}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$Q_p, \text{кДж/г}$
B	559	708	$655 \div 735$	21.5
Al/B:				
стадия 1	600	629	$620 \div 635$	18.8
стадия 2	670	765	$745 \div 770$	—
Ti/B	498	564	$540 \div 580$	12.7
Fe/B	180	593	$575 \div 600$	11.6

Максимальная скорость удельного тепловыделения при окислении аморфного бора достигает $\approx 28 \text{ Вт/г}$ при температуре 710°C [23]. Окисление смеси УДП Al/B протекает в две стадии, что вызвано эндотермическим процессом плавления частиц алюминия при 660°C . Максимальная скорость окисления смеси наблюдается в узких диапазонах $\Delta T = 620 \div 635$ и $745 \div 770^\circ\text{C}$. Суммарное удельное тепловыделение Al/B снижается незначительно (на 12.5 % в сравнении с бором) и составляет $Q_p = 18.8 \text{ кДж/г}$. Тем не менее реакционная способность и суммарное удельное тепловыделение УДП Al/B существенно выше, чем у микропорошка AlB_2 (полученного методом СВС), характеристики окисления которого представлены в [24]. Для смесей УДП Ti/B и Fe/B максимальная скорость изменения массы образца наблюдается в диапазонах более низких температур ($\Delta T = 540 \div 580$ и $575 \div 600^\circ\text{C}$ соответственно), благодаря высокой реакционной способности и низкой температуре интенсивного окисления УДП Ti и Fe ($T_{int} = 487$ и 363°C). При этом суммарное удельное тепловыделение УДП Ti/B и Fe/B снижается на $40 \div 46\%$ по сравнению с аморфным бором.

Таким образом, полученные результаты измерения демонстрируют высокую реакционную способность смеси УДП Al/B, Ti/B и Fe/B при нагреве в окислительной среде. Применение быстрогорящих металлов позволит интенсифицировать процессы воспламенения и горения частиц бора, борсодержащих ВЭМ [3, 7, 25, 26], а также повысить полноту сгорания энергоемких дисперсных горючих.

3.2. Характеристики зажигания ВЭМ

В измерении характеристик зажигания ВЭМ, содержащих УДП Al/B, Ti/B и Fe/B,

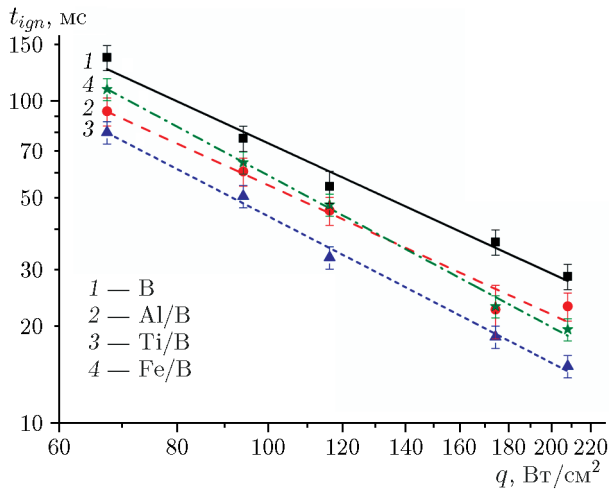


Рис. 3. Время задержки зажигания составов ВЭМ, содержащих ультрадисперсные порошки металлов с бором, в зависимости от плотности теплового потока

Таблица 3

Константы аппроксимационной зависимости $t_{ign}(q)$

№ п/п	ВЭМ с Me/B	$A, 10^4$	n	R^2
1	B	4.20 ± 0.54	1.37 ± 0.11	0.97
2	Al/B	3.61 ± 0.63	1.40 ± 0.12	0.96
3	Ti/B	4.61 ± 0.11	1.51 ± 0.06	0.98
4	Fe/B	7.93 ± 0.13	1.57 ± 0.05	0.99

использовался CO₂-лазер непрерывного действия с регулируемой выходной мощностью. Для установления средних значений времени задержки зажигания t_{ign} ВЭМ проведено по три параллельных опыта при фиксированных значениях плотности теплового потока q . Выбранный диапазон потока излучения $q = 60 \div 210$ Вт/см², падающего на торцевую поверх-

ность образца ВЭМ, соответствовал реальным условиям нагрева в камере сгорания двигателя. Измеренные задержки зажигания ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока излучения представлены на рис. 3. Также на рисунке показана аппроксимация этих данных степенной функцией:

$$t_{ign} = Aq^{-n} [\text{мс}].$$

Значения констант аппроксимации A , n и коэффициента детерминации R^2 приведены в табл. 3.

Установлено, что для базового состава 1 ВЭМ с бором время t_{ign} снижается со 154 до 28 мс при повышении q от 60 до 210 Вт/см². При замене бора высокореакционным УДП Me/B в ВЭМ время задержки зажигания топлива снижается во всем рассматриваемом диапазоне q . Так, для составов 2, 3, 4 ВЭМ с УДП Al/B, Ti/B и Fe/B значения t_{ign} уменьшаются на $24 \div 27$, $38 \div 48$ и $17 \div 35$ % соответственно. Эффективность применения металлического горючего можно представить в виде ряда: $t_{ign}(\text{ВЭМ-Ti/B}) > t_{ign}(\text{ВЭМ-Fe/B}) \geq t_{ign}(\text{ВЭМ-Al/B}) > t_{ign}(\text{ВЭМ-B})$.

С использованием полученных экспериментальных зависимостей $t_{ign}(q)$ и методики расчета констант формальной кинетики зажигания [7] рассчитаны значения энергии активации E , температуры зажигания T_{ign} , произведения теплового эффекта реакции на предэкспонент Qz , скорости тепловыделения W при воздействии на ВЭМ лучистым потоком тепла (табл. 4). При замещении бора на УДП Ti/B и Fe/B скорость тепловыделения на поверхности реакционного слоя ВЭМ существенно увеличивается (до $30 \div 35$ %), при этом температура зажигания топлива находится в диапазоне $T_{ign} = 461 \div 536$ или $503 \div 566$ К в зависимости от действующего потока тепла q .

Таблица 4

Расчетные значения констант формальной кинетики зажигания ВЭМ

№ п/п	ВЭМ с Me/B	E , кДж/моль	Qz , Вт/г	T_{ign} , К при $q = 60 \div 200$ Вт/см ²	W , кВт/г при T_{ign}
1	B	53.1	$1.90 \cdot 10^9$	$491 \div 582$	$4.3 \div 32.6$
2	Al/B	56.8	$5.17 \cdot 10^9$	$490 \div 575$	$4.6 \div 35.7$
3	Ti/B	57.0	$1.51 \cdot 10^{10}$	$461 \div 536$	$5.3 \div 42.1$
4	Fe/B	81.2	$1.58 \cdot 10^{12}$	$503 \div 566$	$5.8 \div 50.7$

Данные высокоскоростной видео- (1920 кадр/с) и тепловизионной (50 кадр/с) съемки при $q = 68 \text{ Вт/см}^2$ показали, что лучистый тепловой поток, попадая на торцевую поверхность образца топлива, прогревает слой, состоящий из кристаллов окислителя и металлизированной матрицы связующего. При достижении температуры разложения топливной композиции на ее поверхности формируется зона окислительно-восстановительных реакций, вызванных разложением полимерного связующего и кристаллов окислителя. При $\approx 300^\circ\text{C}$ происходит образование газовых струй и на поверхности образца появляется светящееся пятно диаметром $2 \div 3 \text{ мм}$ (в зоне максимального теплового потока). Последующий резкий рост температуры и скорости реакций в горячих точках поверхностного слоя топлива способствует образованию зоны пламени в газовой фазе. При $\approx 450^\circ\text{C}$ газовыделение существенно ускоряется и формируется зона видимого пламени. Время образования горячих точек, скорость распространения зоны пламени и оттока светящихся частиц Me с поверхности топливной композиции варьируются в зависимости от природы металлического горючего. При замене бора на УДП Ti/B и Fe/B в ВЭМ время инертного прогрева поверхностного слоя и время появления зоны видимого пламени существенно снижается: соответственно с 80 до 50 мс и со 130 до $85 \div 90 \text{ мс}$, при этом скорость оттока светящихся частиц при фрагментации Ti увеличивается в четыре раза. Интенсивное выделение тепла при реагировании частиц Ti и бора, воспламенение продуктов разложения вблизи поверхности образца способствуют ускоренному развитию пламенных процессов и быстрому переходу нестационарного процесса зажигания в устойчивое горение ВЭМ.

3.3. Характеристики горения ВЭМ

Скорость горения ВЭМ является важной характеристикой топлива, влияющей на скорость оттока продуктов горения с поверхности топлива и на скорость истечения газообразных продуктов сгорания из сопла двигателя. Измерение скорости горения ВЭМ u осуществлялось при разных избыточных давлениях p в бомбе постоянного давления. Средние измеренные значения скорости горения ВЭМ с УДП Me/B в зависимости от давления в камере представ-

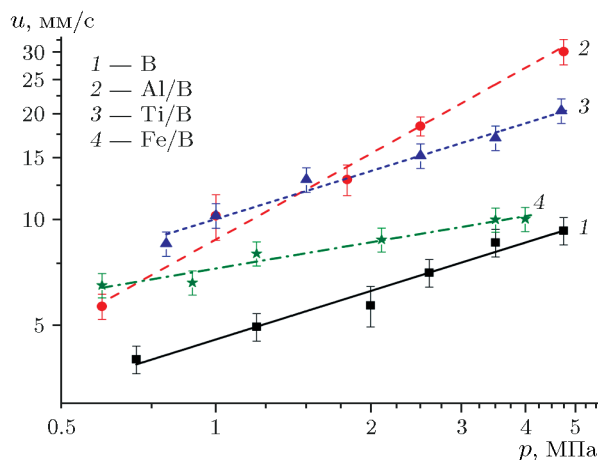


Рис. 4. Скорость горения составов ВЭМ, содержащих ультрадисперсные порошки металлов с бором, в зависимости от давления

Таблица 5

Константы аппроксимационной зависимости $u(p)$

№ п/п	ВЭМ с Me/B	B	ν	R^2
1	В	4.56 ± 0.17	0.46 ± 0.04	0.96
2	Al/B	8.78 ± 0.40	0.81 ± 0.04	0.99
3	Ti/B	10.04 ± 0.30	0.45 ± 0.03	0.97
4	Fe/B	7.26 ± 0.15	0.25 ± 0.05	0.96

лены на рис. 4. Аппроксимация опытных данных осуществлялась с применением степенной функции (в виде закона скорости горения):

$$u = Bp^\nu,$$

где u выражено в мм/с, а p — в МПа. Значения констант аппроксимации B , ν и коэффициента детерминации R^2 приведены в табл. 5.

Установлено, что скорость горения ВЭМ с бором увеличивается с 3.3 до 9.5 мм/с при повышении давления в камере с 0.5 до 5.0 МПа, при этом показатель ν в зависимости $u(p)$ равен 0.46. Применение УДП Al/B в ВЭМ существенно повышает скорость горения (на $50 \div 240\%$ в зависимости от давления) и значение показателя ν (на 76 %). При замене бора на УДП Ti/B в ВЭМ скорость горения возрастает на $\approx 120\%$ в рассматриваемом диапазоне давления, при этом значение показателя ν практически не меняется и составляет 0.45. Минимальное значение показателя ν получено для ВЭМ с УДП Fe/B (0.25), скорость горения которого превышает скорость горения базового

состава на $14 \div 84$ % в зависимости от давления.

Полученные результаты измерения ВЭМ с бором хорошо коррелируют с данными работы [27], в которой представлено влияние 22.8 % аморфного бора на характеристики горения модельных смесевых композиций, содержащих связующее и связующее с ПХА. В качестве полимерного связующего рассматривались олигодиуретанэпоксид ПДИ-3А и олигобутадие-н с концевыми карбоксильными группами СКД-КТР (состав 1Б) и эфируретановый каучук, пластифицированный диметилфталатом, с 42.9 % ПХА (состав 2Б). При повышении давления с 0.5 до 4.0 МПа скорость горения увеличивается с 2.0 до 4.1 мм/с (состав 1Б) и с 3.4 до 10.2 мм/с (состав 2Б). Незначительное расхождение скорости горения состава 2Б (от 3 до 15 %) с полученными данными связано с применением различных полимерных связующих и с отличием массового содержания компонентов.

Таким образом, применение УДП Al/V и Ti/V в ВЭМ существенно увеличивает скорость горения топлива, благодаря высокой реакционной способности наночастиц Al и Ti, их быстрому воспламенению и горению вблизи поверхности топлива, интенсификации горения частиц бора. Эффективность применения смеси Al/V повышается с увеличением давления в камере сгорания за счет повышения скорости тепловыделения в газофазной зоне химических реакций, температуры и скорости оттока продуктов с поверхности ВЭМ. Увеличение скорости горения ВЭМ с Fe/V существенно в диапазоне низких давлений (до 3.0 МПа), что, возможно, вызвано каталитическим разложением ПХА при взаимодействии с оксидным покрытием наноразмерных частиц железа и увеличением доли окислительных элементов в зоне основных химических реакций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментального исследования процессов зажигания и горения установлено влияние быстрогорящих частиц металлов с бором на время задержки зажигания и скорость горения ВЭМ, содержащего ПХА, горючесвязующее вещество и ультрадисперсное металлическое горючее. На основе полученных экспериментальных данных зажигания ВЭМ с УДП Me/V рассчитаны константы формальной

кинетики при воздействии лучистым потоком тепла.

Замещение аморфного бора на УДП Al/V, Ti/V или Fe/V в ВЭМ приводит к снижению времени задержки зажигания (на $24 \div 27$, $38 \div 48$ и $17 \div 35$ % соответственно) в диапазоне плотности теплового потока $60 \div 210$ Вт/см², благодаря высокой реакционной способности наноразмерных частиц Al, Ti и Fe. Эффективность металлического горючего можно представить в виде ряда времен задержки зажигания: $t_{ign}(\text{ВЭМ-Ti/V}) > t_{ign}(\text{ВЭМ-Fe/V}) \geq t_{ign}(\text{ВЭМ-Al/V}) > t_{ign}(\text{ВЭМ-B})$.

Скорость горения ВЭМ с УДП Al/V, Ti/V и Fe/V увеличивается соответственно на $50 \div 240$, $118 \div 121$ и $14 \div 84$ % в зависимости от давления в камере ($0.5 \div 5.0$ МПа) за счет быстрого горения наноразмерных частиц Al, Ti и Fe вблизи поверхности топлива, интенсификации горения частиц бора, увеличения температуры и каталитического разложения окислителя на поверхности топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов Ш. Л., Федоров С. Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. — М.: Торус Пресс, 2015.
2. Синдицкий В. П., Чёрный А. Н., Чжо С. Х., Бобылёв Р. С. Горение смесей перхлората аммония с высококалорийными горючими // Успехи в химии и хим. технол. — 2016. — Т. 30, № 8. — С. 18–20.
3. Korotkikh A. G., Glotov O. G., Arkhipov V. A., Zarko V. E., Kiskin A. B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // Combust. Flame. — 2017. — V. 178. — P. 195–204. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.01.004.
4. Sergienko A. V., Popenko E. P., Slyusarsky K. V., Larionov K. B., Dzidziguri E. L., Kondratyeva E. S., Gro-mov A. A. Burning characteristics of the HMX/CL-20/AP/polyvinyltetrazole binder/Al solid propellants loaded with nanometals // Propell., Explos., Pyrotech. — 2019. — V. 44, N 2. — P. 217–223. — DOI: 10.1002/prep.201800204.
5. Gong L., Li J., Li Y., Yang R. Combustion properties of composite propellants based on two kinds of polyether binders and different oxidizers // Propell., Explos., Pyrotech. — 2020. — V. 45, N 10. — P. 1634–1644. — DOI: 10.1002/prep.202000041.
6. Li Y., Xie W., Wang H., Yang H., Huang H., Liu Y., Fan X. Investigation on the thermal behavior of ammonium dinitramide with different copper-based catalysts // Propell.,

- Explos., Pyrotech. — 2020. — V. 45, N 10. — P. 1607–1613. — DOI: 10.1002/prop.202000065.
7. **Korotkikh A. G., Sorokin I. V., Selikova E. A., Arkhipov V. A.** Effect of B, Fe, Ti, Cu nanopowders on the laser ignition of Al-based high-energy materials // *Combust. Flame.* — 2020. — V. 222. — P. 103–110. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.045.
 8. **Liang D., Xiao R., Liu J., Wang Y.** Ignition and heterogeneous combustion of aluminum boride and boron-aluminum blend // *Aerosol Sci. Technol.* — 2019. — V. 84. — P. 1081–1091. — DOI: 10.1016/j.ast.2018.11.046.
 9. **Сюй С., Чень Ю., Чень С., Ву Д., Лю Д.-Б.** Теплота сгорания порошка Al/B и эффективность его применения в металлизированных взрывчатых веществах при подводном взрыве // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 97–104. — DOI: 10.15372/FGV20160314.
 10. **Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E. L.** Combustion of boron and boron-iron composite particles in different oxidizers // *Combust. Flame.* — 2018. — V. 192. — P. 44–58. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.01.043.
 11. **Hedman T. D., Demko A. R., Kalman J.** Enhanced ignition of milled boron-polytetrafluoroethylene mixtures // *Combust. Flame.* — 2018. — V. 198. — P. 112–119. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.08.020.
 12. **Sandall E., Kalman J., Quigley J. N., Munro S., Hedman T. D.** A study of solid ramjet fuel containing boron–magnesium mixtures // *Propul. Power Res.* — 2017. — V. 6, N 4. — P. 243–252. — DOI: 10.1016/j.jprr.2017.11.004.
 13. **Ao W., Wang Y., Wu S.** Ignition kinetics of boron in primary combustion products of propellant based on its unique characteristics // *Acta Astronaut.* — 2017. — V. 136. — P. 450–458. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.03.002.
 14. **Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E. L.** Oxidation kinetics and combustion of boron particles with modified surface // *Combust. Flame.* — 2016. — V. 173. — P. 288–295. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.08.027.
 15. **Young G., Roberts C. W., Stoltz C. A.** Ignition and combustion enhancement of boron with polytetrafluoroethylene // *J. Propul. Power.* — 2015. — V. 31, N 1. — P. 386–392. — DOI: 10.2514/1.B35390.
 16. **Guo Y., Zhou X., Zhang W., Deng L., Du Y., Cheng Sh.** Combustion characteristics of magnesium borides and their agglomerated particles // *Combust. Flame.* — 2019. — V. 203. — P. 230–237. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.02.003.
 17. **Adil Sh., Murty B. S.** Effect of milling on the oxidation kinetics of aluminium + boron mixture and nanocrystalline aluminium boride (AlB₁₂) // *Thermochim. Acta.* — 2019. — V. 678. — P. 178306. — DOI: 10.1016/j.tca.2019.178306.
 18. **Савельев А. М., Титова Н. С.** Расчетно-теоретический анализ влияния оксидной пленки бората алюминия на условия воспламенения одиночных частиц диборида алюминия // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 65–78. — DOI: 10.15372/FGV20210306.
 19. **Yetter R. A.** Progress towards nanoengineered energetic materials // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 1. — P. 57–81. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.09.008.
 20. **Yetter R. A., Risha G. A., Son S. F.** Metal particle combustion and nanotechnology // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32, N 2. — P. 1819–1838. — DOI: 10.1016/j.proci.2008.08.013.
 21. **Буланин Ф. К., Сидоров А. Е., Киро С. А., Полетаев Н. И., Шевчук В. Г.** Воспламенение аэрозвесей боридов металлов // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 1. — С. 65–71. — DOI: 10.15372/FGV20200107.
 22. **Коротких А. Г., Сорокин И. В., Селихова Е. А., Архипов В. А.** Зажигание и горение смесевых твердых топлив на основе двойного окислителя и борсодержащих добавок // *Хим. физика.* — 2020. — Т. 39, № 7. — С. 32–40. — DOI: 10.31857/S0207401X20070080.
 23. **Коротких А. Г., Сорокин И. В.** Влияние бора на параметры горения ВЭМ и окисление нанопорошков Al/B, Ti/B // *Изв. вузов. Физика.* — 2021. — Т. 64, № 4 (761). — С. 3–8. — DOI: 10.17223/00213411/64/4/3.
 24. **Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А.** Лазерное зажигание порошковых систем на основе алюминия и бора // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 4. — С. 32–40. — DOI: 10.15372/FGV20220404.
 25. **Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А.** Зажигание высокоэнергетического материала, содержащего ультрадисперсный порошок Al/B // *Хим. физика.* — 2022. — Т. 41, № 3. — С. 41–48. — DOI: 10.31857/S0207401X22030074.
 26. **Korotkikh A. G., Sorokin I. V.** Effect of Me/B-powder on the ignition of high-energy materials // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2021. — V. 46, N 11. — P. 1709–1716. — DOI: 10.1002/prop.202100180.
 27. **Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Муравьев Н. В., Фоменков И. В., Васильев А. Л., Шишов Н. И., Пивкина А. Н.** Перспективы использования порошков бора в качестве горючего. III. Влияние полимерного связующего на состав конденсированных продуктов газификации борсодержащих модельных композиций // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 5. — С. 42–54. — DOI: 10.15372/FGV20210504.

Поступила в редакцию 09.11.2022.
Принята к публикации 14.12.2022.