

УДК 536.46

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ, БОР И БОРИДЫ АЛЮМИНИЯ

А. Г. Коротких^{1, 2}, И. В. Сорокин³, Д. В. Теплов¹, В. А. Архипов²

¹ Томский политехнический университет, 634050 Томск, korotkikh@tpu.ru

² Томский государственный университет, 634050 Томск

³ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск

Дисперсные металлические горючие являются энергоемкими компонентами различных гелеобразных и смесевых твердых топлив, существенно повышающими характеристики двигательных установок. В данной статье представлены характеристики горения высокоэнергетического материала (ВЭМ), содержащего окислитель, полимерное горючесвязующее вещество и дисперсное металлическое горючее — алюминий Al, бориды алюминия AlB₂ и AlB₁₂, аморфный бор. В бомбе постоянного давления измерены скорости горения ВЭМ в диапазоне давления 0.7 ÷ 4.0 МПа, установлено влияние дисперсности алюминия и природы металлического горючего на скорость и температуру горения, чувствительность топлива к изменению давления в камере и состав конденсированных продуктов горения. Увеличение дисперсности частиц Al в ВЭМ существенно повышает скорость горения и чувствительность топливной композиции к изменению давления. Замена микроразмерного порошка Al на аморфный бор, AlB₂ или AlB₁₂ в ВЭМ повышает скорость горения в 2.1 ÷ 2.2 раза при давлении 4.0 МПа, при этом степенной показатель в законе скорости горения $u(p) = Bp^\nu$ увеличивается с 0.22 до 0.45.

Ключевые слова: высокоэнергетический материал, алюминий, аморфный бор, борид алюминия, оксидное покрытие, скорость горения, давление.

DOI 10.15372/FGV2022.9253

ВВЕДЕНИЕ

Микро- и ультрадисперсные порошки металлов являются высокоэнергетическими компонентами жидких и смесевых твердых топлив, существенно повышающими их стабильность горения, удельную теплоту сгорания и температуру в камере сгорания, скорость истечения газообразных продуктов из сопла и удельный импульс двигательных установок [1–6]. Горение металлосодержащих топливных композиций включает в себя ряд физико-химических процессов, в том числе фазовые переходы и окисление газообразных продуктов, воспламенение и гетерогенное горение конденсированных частиц металла, формирование оксидных частиц в газовой фазе и частиц-агломератов на поверхности топлива [7–12]. Кинетика химических реакций, агломерация и механизм горения частиц металлов в окисли-

тельной среде существенно влияют на скорость выделения тепла, характеристики горения топлив и продуктов сгорания [11, 13–22]. При горении металлических частиц возможны реакции металла с окислителем и формирование нескольких газообразных и конденсированных оксидов, которые влияют на интенсивность реагирования компонентов топлива.

Для повышения удельной теплоты и полноты сгорания металлов в камере сгорания могут быть рассмотрены борсодержащие металлические горючие. Анализ результатов исследований [2, 7, 8, 10, 11, 15, 23–28] показал, что разрабатываются новые методы получения и изучаются характеристики воспламенения и горения дисперсных энергоемких систем, состоящих из частиц бора, покрытых слоем Al, Ni или Mg, механоактивированных смесей Al—B, Ti—B или Mg—B, боридов AlB_n, TiB_n или MgB_n, как в окислительных средах, так и при горении топливных композиций. В связи с этим представляет интерес изучение особенностей и характеристик горения указанных бор-металлических систем в высокоэнергетических

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

© Коротких А. Г., Сорокин И. В., Теплов Д. В., Архипов В. А., 2023.

материалах (ВЭМ), содержащих окислитель и горючесвязующее вещество (ГСВ), а также их влияния на зависимость скорости горения от давления, температуру горения в газовой фазе, содержание конденсированных продуктов сгорания и т. д.

Целью данной работы является исследование влияния дисперсности алюминия и содержания борметаллических горючих (аморфного бора, AlB_2 и AlB_{12}) на характеристики горения ВЭМ, включающего в себя окислитель и полимерное горючесвязующее вещество, при варьировании давления в камере от 0.7 до 4 МПа.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Стационарная скорость горения ВЭМ является важной характеристикой топлива, оказывающей влияние на скорость истечения газообразных продуктов сгорания из сопла и на удельный импульс двигателя. Горение ВЭМ, содержащих алюминий и борметаллические дисперсные горючие, исследовалось в бомбе постоянного давления при фиксированных значениях давления. Схема установки для измерения скорости горения и конструкция бомбы постоянного давления представлены на рис. 1.

Цилиндрический образец ВЭМ (10) с регистрирующими проводниками (9) крепится на регулируемом держателе (12), который затем помещается в герметичный сосуд (14). Через патрубок (15) осуществляются откачка воздуха и последующая подача азота из баллона высокого давления до заданного значения давления. Давление в корпусе бомбы измеряется манометром (16) с относительной погрешностью не более 5 % и остается практически постоянным при горении ВЭМ благодаря применению баллонов-ресиверов (рис. 1, а). Образец ВЭМ поджигается нихромовой спиралью (7), размещенной на торцевой поверхности топлива. Благодаря бронированию боковой поверхности образца ВЭМ двойным слоем изоляционной ленты, движение зоны пламени происходит вдоль оси цилиндрического образца с оттоком продуктов сгорания с торцевой поверхности топлива. Время стационарного горения фиксированного по высоте образца ВЭМ регистрируется на осциллографе по разности времен сигналов от перегорающих проводников при прохождении высокотемпературной зоны пламени. Скорость горения ВЭМ рассчитывается по отношению расстояния между двумя проводниками к времени горения ВЭМ.

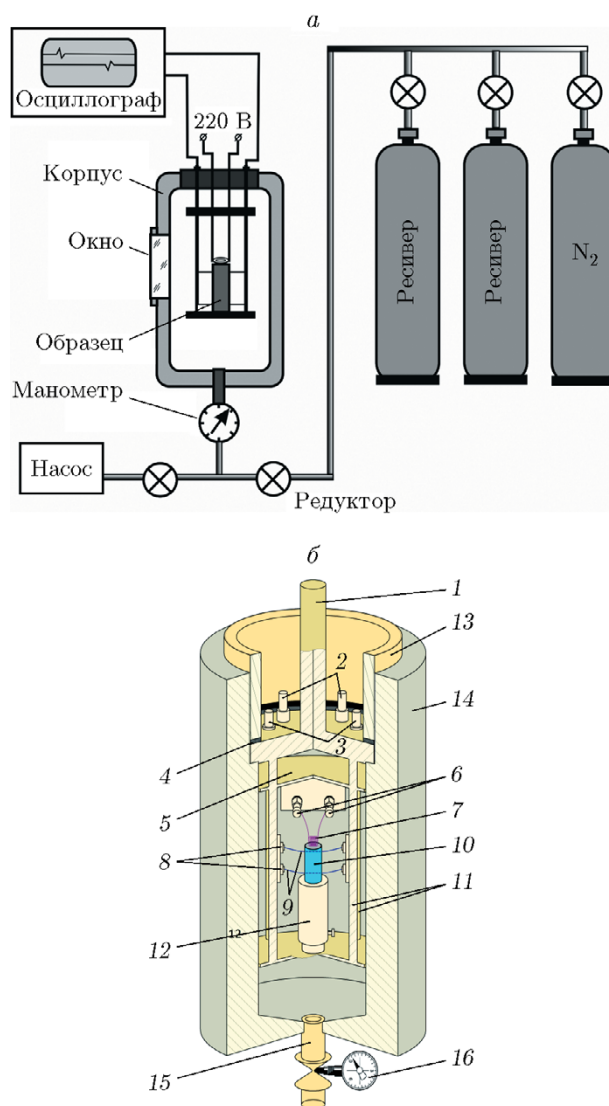


Рис. 1. Схема установки для измерения скорости горения ВЭМ (а) и конструкция бомбы постоянного давления (б):

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

Для изучения характеристик горения ВЭМ использовалась базовая смесевая композиция, состоящая из перхлората аммония (ПХА) двух фракций — с размером частиц менее 50 мкм (60 %) и $160 \div 315$ мкм (40 %), ГСВ — бутадиенового каучука марки СКДМ-80 и динитрилоксидного отвердителя ТОН-2.

Таблица 1
Компонентный состав ВЭМ,
содержащих порошки металла и бора

Образец	Массовое содержание компонента, %		
	ПХА	ГСВ	порошок
ВЭМ-1	64.6	19.7	15.7, μAl
ВЭМ-2	64.6	19.7	15.7, Alex
ВЭМ-3	64.6	19.7	15.7, В
ВЭМ-4	64.6	19.7	15.7, AlB_2
ВЭМ-5	64.6	19.7	15.7, AlB_{12}

Компонентный состав ВЭМ, содержащих различные металлические горючие, представлен в табл. 1.

В качестве горючего выбраны микроразмерные порошки алюминия μAl (среднемассовый диаметр $d_{43} = 10.6$ мкм), боридов алю-

миния AlB_2 ($d_{43} = 6.2$ мкм) и AlB_{12} ($d_{43} = 2.3$ мкм), а также ультрадисперсные порошки алюминия Alex (среднесчетный диаметр $d_{10} = 0.1$ мкм) и аморфного бора ($d_{10} = 0.2$ мкм). С применением электронного растрового микроскопа MIRA 3 LMU TESCAN изучены форма, структура поверхности и размер частиц дисперсных металлов и бора, фотографии которых представлены на рис. 2. Порошки боридов алюминия AlB_2 и AlB_{12} изготавливались СВС-методом с последующим измельчением спеченных образцов в шаровой барабанной мельнице, поэтому все частицы имели форму многогранников. Реакционная способность к окислению и характеристики воспламенения используемых дисперсных металлических горючих детально изучены в работе [29].

Технология изготовления лабораторных образцов ВЭМ с дисперсными металлическими горючими включала в себя последовательное перемешивание дисперсных компонентов

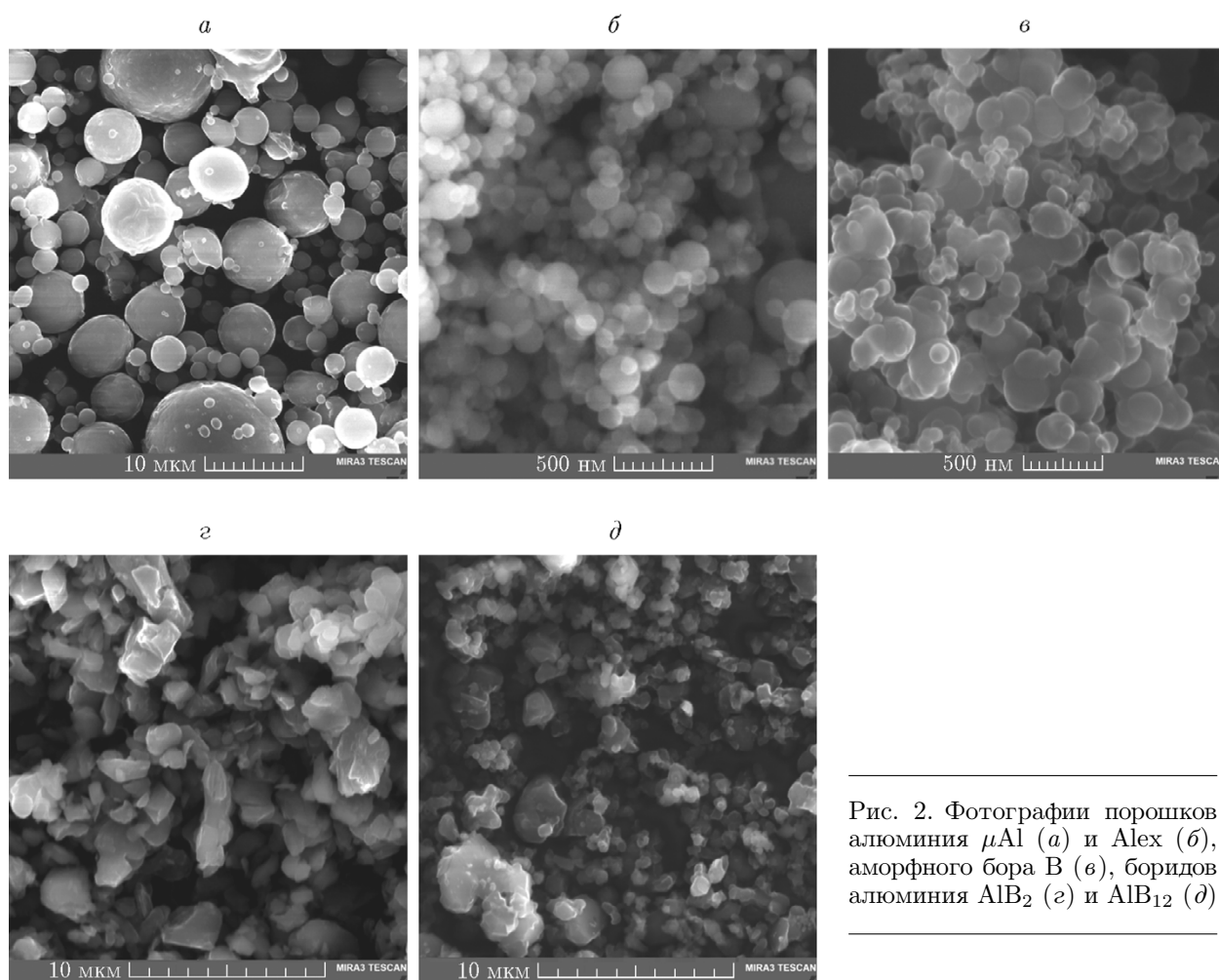


Рис. 2. Фотографии порошков алюминия μAl (а) и Alex (б), аморфного бора В (в), боридов алюминия AlB_2 (г) и AlB_{12} (д)

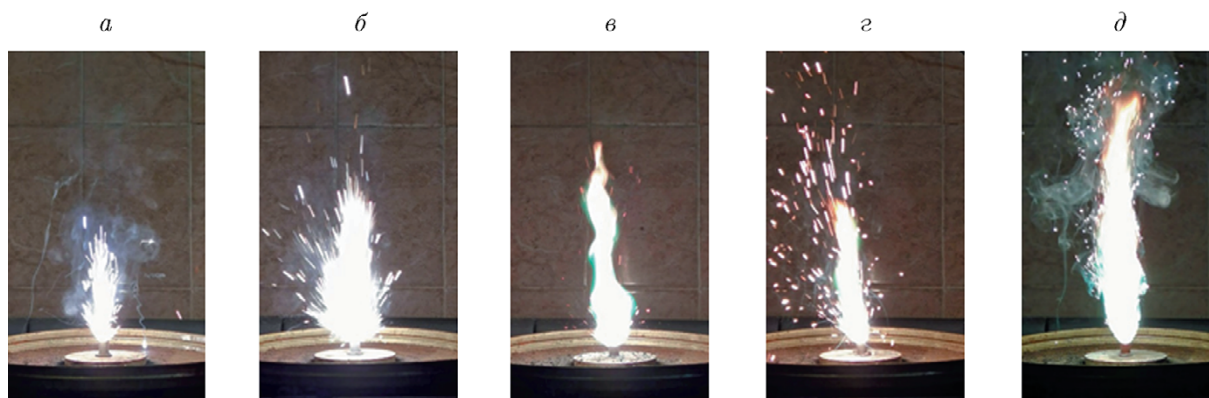


Рис. 3. Фотографии горения на воздухе образцов ВЭМ, содержащих порошки μAl (а), Alex (б), В (в), AlB_2 (г) и AlB_{12} (д)

(окислителя, металла и технологической добавки) с ГСВ, проходное прессование перемешанных компонентов ВЭМ в цилиндрической пресс-форме высотой 30 мм с диаметром отверстий 10 мм и полимеризацию ВЭМ в сушильном шкафу при температуре 70°C . Плотность отвержденных ВЭМ составляла $1.64 \div 1.70 \text{ г/см}^3$ и варьировалась при изменении компонентного состава. На рис. 3 представлены фотографии горения отвержденных образцов ВЭМ на воздухе при атмосферном давлении.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение скорости горения u топлива осуществлялось при нескольких значениях избыточного давления p в камере бомбы; с каждым значением p проводилось по 3–4 опыта и рассчитывалось среднее значение скорости горения топлива. В эксперименте относительная погрешность измерения скорости горения не превышала 10 %. Измеренные значения u при различных давлениях и полученные в ходе обработки аппроксимационные зависимости $u(p)$ представлены на рис. 4. Аппроксимация опытных данных осуществлялась с применением степенного закона скорости горения в виде

$$u = Bp^\nu,$$

где B и ν — константы аппроксимации. Расчетные значения констант аппроксимации и коэффициента детерминации R^2 приведены в табл. 2.

С увеличением давления в камере с 0.7 до 4.0 МПа скорость горения базового ВЭМ-1 с μAl повышается с 2.6 до 3.8 мм/с, при этом

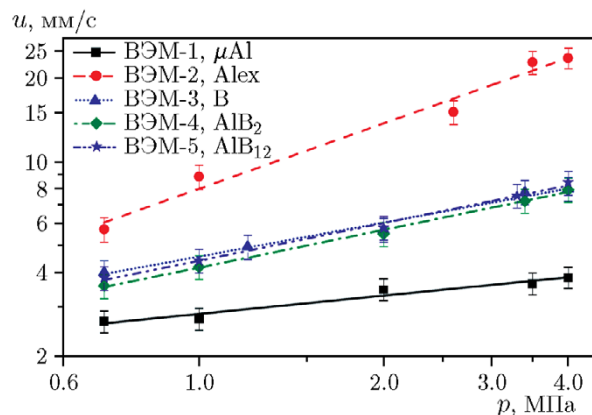


Рис. 4. Зависимость скорости горения ВЭМ, содержащих порошки μAl (1), Alex (2), В (3), AlB_2 (4) и AlB_{12} (5), от давления

Таблица 2

Константы аппроксимации уравнения $u(p)$ и коэффициент детерминации

Образец	B	ν	R^2
ВЭМ-1, μAl	2.83 ± 0.07	0.22 ± 0.03	0.94
ВЭМ-2, Alex	8.00 ± 0.50	0.78 ± 0.06	0.97
ВЭМ-3, В	4.56 ± 0.12	0.41 ± 0.03	0.98
ВЭМ-4, AlB_2	4.16 ± 0.06	0.45 ± 0.02	0.99
ВЭМ-5, AlB_{12}	4.41 ± 0.07	0.45 ± 0.02	0.99

показатель степени в законе скорости горения является минимальным ($\nu = 0.22$). При замене микропорошка μAl ультрадисперсным Alex скорость горения ВЭМ-2 существенно увеличивается (в $2.3 \div 6.2$ раза в зависимости от давления), а показатель степени становится

Таблица 3

Температура горения, массовые доли и фазовый состав конденсированных продуктов горения в камере сгорания и на выходе из сопла, скорость газообразных продуктов

Образец	T_{ad} , К	m_c (состав)	m_a (состав)	w , м/с
ВЭМ-1, μAl	2 634	0.254 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.254$)	0.295 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.288$; $C = 0.007$)	2 347
ВЭМ-2, Alex	2 562	0.263 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.263$)	0.276 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.276$)	2 300
ВЭМ-3, В	2 216	0.172 ($\text{BN} = 0.136$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 0.019$; $\text{B}_4\text{C} = 0.017$)	0.373 ($\text{B}_2\text{O}_3 = 0.193$; $\text{BN} = 0.136$; $\text{B}_4\text{C} = 0.028$; $C = 0.016$)	2 229
ВЭМ-4, AlB_2	2 367	0.176 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.109$; $\text{BN} = 0.067$)	0.328 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.163$; $\text{BN} = 0.111$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 0.054$)	2 310
ВЭМ-5, AlB_{12}	2 238	0.160 ($\text{BN} = 0.134$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 0.025$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.001$)	0.351 ($\text{B}_2\text{O}_3 = 0.176$; $\text{BN} = 0.136$; $C = 0.019$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.018$; $\text{B}_4\text{C} = 0.002$)	2 230

ся максимальным ($\nu = 0.78$) для данной композиции. Для ВЭМ-3–5 с бором и боридами алюминия AlB_2 , AlB_{12} скорость горения увеличивается с $3.6 \div 3.9$ мм/с (при $p = 0.7$ МПа) до $7.8 \div 8.3$ мм/с (при $p = 4.0$ МПа), что в $1.4 \div 2.2$ раза выше скорости горения базового ВЭМ-1. Значение ν для данных композиций становится примерно одинаковым и не зависит от массовой концентрации бора в дисперсном металлическом горючем: 0.41 для ВЭМ-3 с В и 0.45 для ВЭМ-4–5 с AlB_2 и AlB_{12} . Полученные экспериментальные данные по скорости горения ВЭМ-3 с В и ВЭМ-4 с AlB_2 хорошо коррелируют с данными работ [31–33], в которых установлены зависимости скорости горения от давления для близких по компонентному составу ВЭМ (ПХА/ГСВ/ AlB , ПХА/ГСВ/В, ПХК/ГСВ/ AlB_2), имеющих показатель степени в диапазоне $\nu = 0.41 \div 0.57$.

Таким образом, уменьшение диаметра частиц Al (с микро- до нанометров), применяемого в ВЭМ, способствует существенному увеличению скорости горения и чувствительности топлива к изменению давления (показателя ν), благодаря высокой удельной площади поверхности частиц и реакционной способности Alex, дополнительному выделению тепла при его окислении и повышению скорости термического разложения компонентов на поверхности реакционного слоя. Ранее было установлено [29], что время задержки воспламенения ультрадисперсного порошка Alex в воздухе в

$6 \div 11$ раз меньше, чем у микропорошка алюминия при одинаковых условиях нагрева. При использовании Alex в ВЭМ-2 время задержки зажигания существенно снижается (примерно на $65 \div 95$ % [30]) в зависимости от действующего на образец теплового потока q , что хорошо согласуется с полученной зависимостью скорости горения ВЭМ-2.

При использовании бора в ВЭМ-3 скорость горения топлива увеличивается в зависимости от давления в $1.5 \div 2.1$ раза по сравнению с базовым ВЭМ-1 с μAl , вследствие относительно малого размера и быстрого воспламенения частиц бора вблизи поверхности реакционного слоя. Время задержки зажигания ВЭМ-3 с бором относительно ВЭМ-1 с μAl снижается на $25 \div 31$ %, а относительно ВЭМ-2 с Alex — увеличивается на $25 \div 55$ % [30] в зависимости от скорости прогрева и действующего на поверхность ВЭМ теплового потока. Горение частиц бора происходит в газовой фазе, при этом формируются преимущественно нитриды, оксиды и карбиды бора (табл. 3). Скорость горения ВЭМ-3 относительно ВЭМ-2 с Alex меньше на $35 \div 66$ % (в зависимости от давления).

Применение боридов AlB_2 в ВЭМ-4 и AlB_{12} в ВЭМ-5 повышает скорость выделения тепла и температуру на поверхности топлива [29, 30], а также скорость горения топливной композиции в целом относительно базового ВЭМ-1 с μAl : ВЭМ-4 на $35 \div 103$ % и ВЭМ-5 на $43 \div 116$ %. Данные термодинамического рас-

чета (см. табл. 3, программа TERRA [34]) показывают, что массовая концентрация алюминия и бора в исходных дисперсных металлических горючих влияет на температуру горения, массовый и фазовый состав конденсированных продуктов горения при сжигании ВЭМ в камере сгорания при давлении 4.0 МПа (давление на выходе из сопла 0.1 МПа). Замена μAl на бор в ВЭМ-3 снижает температуру горения в камере на 418 К (15.9 %), а скорость истечения газообразных продуктов — на 118 м/с (5.0 %), при этом доля конденсированных продуктов горения m_a увеличивается на 0.078 (26.4 %) до максимального значения 0.373. Использование AlB_2 (с 55.5 % Al) в ВЭМ-4 повышает температуру горения и скорость газообразных продуктов на выходе из сопла на 6.8 и 3.6 % соответственно (относительно данных для ВЭМ-3 с B). При этом основными конденсированными продуктами горения в камере являются оксид Al_2O_3 и нитрид бора. При использовании AlB_{12} (с 17.2 % Al) в ВЭМ-5 температура горения, скорость газообразных продуктов и состав конденсированных продуктов горения изменяются незначительно по сравнению с использованием AlB_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного экспериментального исследования горения ВЭМ на основе ПХА/СКДМ-80, содержащего дисперсные добавки алюминия, аморфного бора и боридов алюминия, определены зависимости скорости горения от давления, влияние дисперсности алюминия и природы металлического горючего (массовой концентрации бора) на характеристики горения топлива.

Максимальная скорость горения зафиксирована при использовании ультрадисперсного порошка Alex в ВЭМ-2: $6.1 \div 23.7$ мм/с при давлении $0.7 \div 4.0$ МПа. Высокая реакционная способность Alex способствует повышению скорости выделения тепла на поверхности реакционного слоя и скорости горения топлива.

Применение порошка аморфного бора в ВЭМ-3 повышает в зависимости от давления скорость горения топлива на $51 \div 109$ % относительно базового ВЭМ-1 с μAl . При замене μAl на AlB_2 и AlB_{12} в ВЭМ скорость горения топлива увеличивается на $35 \div 103$ % (ВЭМ-4) и на $43 \div 116$ % (ВЭМ-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sundaram D., Yang V., Yetter R. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2017. — V. 61. — P. 293–365. — DOI: 10.1016/j.pecs.2017.02.002.
2. Pang W.-Q., Yetter R. A., DeLuca L. T., Zarko V. E., Gany A., Zhang X.-H. Boron-based composite energetic materials (B-CEMs): Preparation, combustion and applications // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2022. — V. 93. — 101038. — DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101038.
3. McClain M. S., Gunduz I. E., Son S. F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings // *Proc. Combust. Inst.* — 2019. — V. 37, N 3. — P. 3135–3142. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.05.052.
4. DeLuca L. T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion // *Defence Technol.* — 2018. — V. 14, N 5. — P. 357–365. — DOI: 10.1016/j.dt.2018.06.005.
5. Anniyappan M., Talawar M. B., Sinha R. K., Murthy K. P. S. Обзор современных энергетических материалов // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 3–31. — DOI: 10.15372/FGV20200501.
6. Park S., Choi S., Kim K., Kim W., Park J. Effects of ammonium perchlorate particle size, ratio, and total contents on the properties of a composite solid propellant // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2020. — V. 45, N 9. — P. 1376–1381. — DOI: 10.1002/prep.202000055.
7. 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.
8. Пивкина А. Н., Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Фролов Ю. В., Муравьев Н. В. Перспективы использования порошков бора в качестве горючего. II. Влияние добавок алюминия, магния и их соединений на термическое поведение оксида бора // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 28–36. — DOI: 10.15372/FGV20200205.
9. Pang W.-Q., DeLuca L. T., Fan X.-Z., Glotov O. G., Wang K., Qin Z., Zhao F.-Q. Combustion behavior of AP/HTPB/Al composite propellant containing hydroborate iron compound // *Combust. Flame.* — 2020. — V. 220. — P. 157–167. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.037.
10. 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. — С. 3–8.
11. 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.
12. Okniński A., Nowakowski P., Kasztankiewicz A. Survey of low-burn-rate solid rocket propellants // *Innovative Energetic Materials: Properties, Combustion Performance and Application* / W.-Q. Pang, L. T. DeLuca, A. A. Gromov, A. S. Cumming (Eds). — 2020. — P. 313–349. — DOI: 10.1007/978-981-15-4831-4.11.
13. 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.
14. Braconnier A., Gallier S., Halter F., Chauveau C. Aluminum combustion in CO₂–CO–N₂ mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 3. — P. 4355–4363. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.028.
15. Яновский Л. С., Лемперт Д. Б., Разносчиков В. В., Аверьков И. С., Шаров М. С. Оценка эффективности некоторых металлов и неметаллов в твердых топливах для ракетно-прямоточных двигателей // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 1. — С. 81–94. — DOI: 10.15372/FGV20200109.
16. Sippel T. R., Son S. F., Groven L. J., Zhang S., Dreizin E. L. Exploring mechanisms for agglomerate reduction in composite solid propellants with polyethylene inclusion modified aluminum // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 3. — P. 846–854. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.08.013.
17. Глотов О. Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // *Успехи физ. наук.* — 2019. — Т. 189, № 2. — С. 135–171.
18. Коротких А. Г., Архипов В. А., Сорокин И. В., Селихова Е. А. Зажигание и горение высокоэнергетических материалов, содержащих алюминий, бор и диборид алюминия // *Хим. физика и мезоскопия.* — 2018. — Т. 20, № 1. — С. 5–14.
19. 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.
20. Glotov O. G., Zarko V. E. Formation of Al oxide particles in combustion of aluminized condensed systems // *Sci. Technol. Energ. Mater.* — 2013. — V. 74, N 6. — P. 139–143.
21. Denisjuk A. P., Duy Tuan N., Sizov V. A. Combustion behavior of the inorganic nitrates-based compositions. Part II: Effect of Al and Al–Mg alloy on burning rate // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2022. — V. 47, N 5. — Article N e202100145. — DOI: 10.1002/prep.202100145.
22. Walzel R. K., Levitas V. I., Pantoya M. L. Aluminum particle reactivity as a function of alumina shell structure: Amorphous versus crystalline // *Powder Technol.* — 2020. — V. 374. — P. 33–39. — DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.084.
23. Ягодников Д. А., Гусейнов Ш. Л., Стороженко П. А., Шпара А. П., Сухов А. В., Федоров С. Г. Морфологический, химический и спектральный анализы продуктов сгорания микро- и нанодисперсных частиц боридов алюминия // *Докл. АН.* — 2019. — Т. 484, № 1. — С. 44–47. — DOI: 10.31857/S0869-5652484144-47.
24. Яновский Л. С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. — М.: Физматлит, 2009.
25. 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.
26. Liang D., Xiao R., Liu J., Wang Y. Ignition and heterogeneous combustion of aluminum boride and boron-aluminum blend // *Aerospace Sci. Technol.* — 2019. — V. 84. — P. 1081–1091. — DOI: 10.1016/j.ast.2018.11.046.
27. 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/prep.202100180.
28. 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.
29. Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А. Лазерное зажигание порошковых систем на основе Al и B // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 4. — P. 32–40. — DOI: 10.15372/FGV20220404.
30. Коротких А. Г., Сорокин И. В., Архипов В. А. Влияние нитрата аммония и горючесвязующего вещества на характеристики зажигания высокоэнергетических материалов, содержащих бориды алюминия // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 96–105. — DOI: 10.15372/FGV20220512.
31. Pang W.-Q., De Luca L. T., Fan X. Zh., Glotov O. G., Zhao F. Q. Boron-based Fuel-rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects. — Boca Raton: CRC Press, 2019. — DOI: 10.1201/9780429030680
32. Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Мурavyev 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.*

- ва. — 2021. — Т. 57, № 5. — С. 42–54. — DOI: 10.15372/FGV20210504.
33. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Сарабьев В. И.** Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и наночастиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 51–58. — DOI: 10.15372/FGV20160307.
34. **Белов Г. В., Трусев Б. Г.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.

*Поступила в редакцию 18.11.2022.
Принята к публикации 14.12.2022.*
