

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.59.06

УДК 544.02

**Е.А. Лебедева, С.А. Астафьева**

Институт технической химии УрО РАН

(филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН), Пермь, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОРСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Одной из актуальных задач, возникающих при создании перспективных летательных аппаратов с внутриатмосферной зоной эксплуатации на базе прямоточных воздушно-реактивных двигателей газогенераторной схемы, является изучение полноты сгорания энергоемких твердых топлив. В качестве энергоемкой добавки исследован бор. Эффективность применения топлива, содержащего бор, снижается длительными задержками зажигания, вызванными медленными гетерогенными реакциями, связанными с удалением или модификацией оксидного слоя, покрывающего бор. Проведены термодинамические расчеты для моделирования горения борсодержащих энергетических конденсированных систем в прямоточном воздушно-реактивном двигателе с протеканием рабочего процесса по двухзонной схеме. Неравновесность процесса горения исследуемых энергетических конденсированных систем смоделирована исключением из базы данных продуктов сгорания веществ, которые не успевают образоваться из-за недостаточности времени пребывания в первой зоне прямоточного воздушно-реактивного двигателя. В качестве модельной системы выбран состав, состоящий из широко используемых компонентов: окислитель – перхлорат аммония, связующее на основе олигодиепоксида марки ПДИ-ЗАК. Установлено, что увеличение в продуктах сгорания борной кислоты приводит к нелинейной зависимости температуры продуктов сгорания от содержания бора в модельной системе. Величину работоспособности борсодержащих энергетических конденсированных систем оценивали по произведению  $RT(1 - z)$ . Изучено влияние содержания магния на состав и характеристики продуктов сгорания выбранных борсодержащих модельных систем. Выявленные закономерности термодинамических характеристик изученных систем позволили определить состав компонентов с приемлемыми характеристиками продуктов сгорания и предложить способы для модификации порошков бора с целью дальнейших экспериментальных исследований горения борсодержащих энергетических конденсированных систем.

**Ключевые слова:** термодинамические расчеты, бор, энергетические конденсированные системы, прямоточный воздушно-реактивный двигатель, конденсированная фаза.

**E.A. Lebedeva, S.A. Astafeva**

Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

(a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences), Perm, Russian Federation

## **RESEARCH OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BORON-CONTAINING ENERGETIC CONDENSED SYSTEMS**

One of the urgent problems arising in the creation of promising aircraft with an intra-atmospheric zone of operation on the basis of direct-flow air-jet engines of the gas generator scheme is the study of the completeness of combustion of energy-intensive solid propellant. In this paper, boron was studied as an energy-intensive additive. The efficiency of the propellant containing boron is reduced by long ignition delays connected with slow heterogeneous reactions associated with the removal or modification of the oxide layer covering the boron. The authors have carried out thermodynamic calculations for modeling the combustion of boron-containing energetic condensed systems in a ramjet engine with the flow of the working process according to a two-zone scheme. Non-equilibrium combustion process of the investigated energetic condensed systems modeled with the exception of the database products of combustion of substances which don't have time to be formed because of insufficient residence time in the first zone ramjet engine. As a model system, a composition consisting of widely used components was chosen: an oxidizer-ammonium perchlorate, a binder based on PDI-ZAK oligodienepoxide. It is established that the increase of boric acid in the combustion products leads to a nonlinear dependence of the temperature of the combustion products on the boron content in the model system. The efficiency of boron-containing energetic condensed systems was estimated by the product  $RT(1-z)$ . The influence of magnesium content on the composition and characteristics of combustion products of selected boron-containing model systems was studied. The revealed regularities of the thermodynamic characteristics of the systems studied made it possible to determine the composition of components with acceptable characteristics of the combustion products and to propose methods for modifying boron powders for further experimental studies of the combustion of boron-containing energetic condensed systems.

**Keywords:** thermodynamic calculations, boron, energetic condensed systems, ramjet engine, condensed phase.

До настоящего времени порошкообразные металлы успешно использовались в качестве добавок к горючему в гидрореагирующих и смесевых твердотопливных композициях для твердотопливных ракетных двигателей, гидрореагирующих двигателей, ракетных прямоточных двигателей, прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) [1]. Обладая большой теплотой сгорания и высокой плотностью, порошкообразные металлы способны существенно увеличить такие важные характеристики двигательных установок и изделия в целом, как удельный импульс и коэффициент массового совершенства, а также обеспечить большую взрыво- и пожаробезопасность. В последние десятилетия работы по усовершенствованию твердых ракетных топлив (ТРТ) в области химии и материаловедения направлены на повышение эффективности применения порошкообразных металлов. Так, широкий ряд исследований связан с модификацией алюминия различными органическими и неорганическими покрытиями, использованием наноразмерных порошков для снижения его агломерации в продуктах сгорания и увеличения полноты окисления [2–5].

В то же время возобновились исследования особенностей горения (воспламенения) бора. Известно, что эффективность применения топлива, содержащего бор, снижается длительными задержками зажигания, вызванными медленными гетерогенными реакциями, связанными с удалением или модификацией оксидного слоя, покрывающего бор [6–8].

Несмотря на обширные исследования, охватывающие несколько десятилетий, процессы, связанные с задержками воспламенения бора, до настоящего времени не до конца изучены.

В настоящее время широко применяемые ракетные двигатели на твердом топливе практически достигли предела своего совершенствования, в связи с этим все большее количество работ посвящено двигательным установкам на основе ПВРД, в том числе ракетно-прямоточных двигателей на твердом и пастообразном топливах [9–11]. И эффективность применения порошков бора исследуется в первую очередь применительно к данным системам [12].

В ПВРД газогенераторной схемы реализуются условия с высокими значениями температуры торможения и скорости продуктов сгорания (ПГ) [13]. Время пребывания ПГ в камерах дожигания относительно невелико, что приводит к незавершенности физико-химических процессов. В связи с этим важной задачей является разработка мероприятий, обеспечивающих высокий уровень полноты сгорания ТРТ и минимальные потери полного давления потока газа [10, 14].

На данном этапе исследований нас интересует моделирование горения борсодержащих энергетических конденсированных систем (ЭКС) в ПВРД с протеканием рабочего процесса по двухзонной схеме. Предполагается, что в рамках термодинамического моделирования, учитывая возможности программного комплекса TERRA [15], неравновесность, возникающую из-за недостаточного времени нахождения рабочего тела в зоне реакции для установления равновесных концентраций реагентов «медленной» реакции, можно моделировать исключением из базы данных веществ, которые не успеют образоваться [16]. Экспериментальное изучение продуктов сгорания в первой зоне будет смоделировано на установке, разработанной в ИТХ УрО РАН [17].

Целью данного исследования является проведение термодинамического моделирования неравновесного состава и свойств рабочего тела, содержащего продукты сгорания борсодержащих энергетических конденсированных систем, для установления оптимального состава с целью дальнейших экспериментальных исследований по горению ЭКС.

### **Методика термодинамического расчета**

В настоящее время без методов термодинамического моделирования невозможно представить разработку и создание не только ракетных двигателей, но и любых других высокотемпературных установок или процессов.

Исходными данными при термодинамическом моделировании процессов горения энергетических конденсированных систем являются данные, определяющие исходный элементный

состав изучаемой системы, т.е. химический состав энергетической конденсированной системы применительно к ракетным двигателям. Равновесное состояние любой закрытой и изолированной термодинамической системы однозначно определяется значениями двух параметров состояния. Ими могут быть любые два параметра из следующих шести термодинамических величин: давление, температура, удельный объем, энтропия, кДж/(кг·К); полная энтальпия, полная внутренняя энергия, кДж/кг. При моделировании горения энергетических конденсированных систем чаще всего используют полную энтальпию и давление.

Для выполнения термодинамических расчетов равновесного состава и характеристик продуктов сгорания борсодержащих энергетических конденсированных систем использована программа TERRA [15]. Расчеты выполнены при варьировании трех компонентов состава топлива и давления в камере сгорания 2 МПа; на выбранных составах изучено влияние давления в камере сгорания в пределах до 2 МПа.

## Результаты и обсуждение

Для наших исследований мы выбрали модельную систему, состоящую из широко используемых компонентов: окислитель – перхлорат аммония, связующее на основе олигодиенэпоксида марки ПДИ-ЗАК. Бор был рассмотрен в качестве высокоэнергетической добавки. Эффективность процесса работы двигателя зависит напрямую от состава продуктов сгорания [18]. Предполагается, что минимальное содержание конденсированной фазы в составе продуктов сгорания будет способствовать лучшей работоспособности двигателя.

Результаты термодинамических расчетов борсодержащих составов представлены на рис. 1, 2. Анализ продуктов сгорания борсодержащих составов показал, что качественный состав конденсированной фазы сильно зависит как от условий процесса горения (температура и давление), так и от состава ЭКС. Так, в конденсированной фазе можно наблюдать оксид бора, нитрид бора и карбид бора. Необходимо отметить, что в первоначальных расчетах помимо перечисленных ранее компонентов получены также такие борсодержащие соединения, как  $\text{BH}$ ,  $\text{BH}_2$ ,  $\text{BH}_3$ ,  $\text{BH}_4$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{BO}$ ,  $\text{BO}_2$ ,  $\text{B}_2$ ,  $\text{B}_2\text{H}$ ,  $\text{B}_2\text{H}_2$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{B}_2\text{O}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_3\text{O}_3\text{H}_3$ ,  $\text{HBO}$ ,  $\text{HBO}_2$ ,  $\text{H}_3\text{B}_3\text{O}_6$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{B(ж)}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3(\text{ж})$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3(\text{кр})$ ,  $\text{B}_3\text{O}_3\text{H}_3(\text{кр})$  и др. Часть борсодержащих соединений нами была исключена из расчетов с учетом многолетних исследований горения бора [12], тем самым смоделирована неравновесность процесса.

Анализ данных состава конденсированной фазы продуктов сгорания модельной системы, представленных на рис. 2, показал следующее:

- содержание конденсированного углерода прямолинейно зависит от количества ПДИ-ЗАК и обратно пропорционально количеству бора (см. рис. 2, а);

- зависимость содержания конденсированного бора в ПГ носит сложный характер. Для выбранного компонентного состава ЭКС бор практически полностью сгорает, что подтверждает его отсутствие в ПГ вплоть до 60 % бора в исходном составе. Дальнейшее увеличение содержания бора в композиции приводит к его появлению в ПГ (см. рис. 2, б);

- зависимость количества газообразного оксида бора в ПГ от содержания ПХА носит экстремальный характер с пиком при 80 % ПХА в пределах содержания связующего 30 %, свыше данного значения оксид бора в виде пара присутствует в минимальных количествах, менее 1 % (см. рис. 2, в).

- экстремальную зависимость конденсированного оксида бора от содержания ПДИ-ЗАК с пиком при 60–65 % ПДИ-ЗАК в пределах содержания бора до 30 % (см. рис. 2, з);

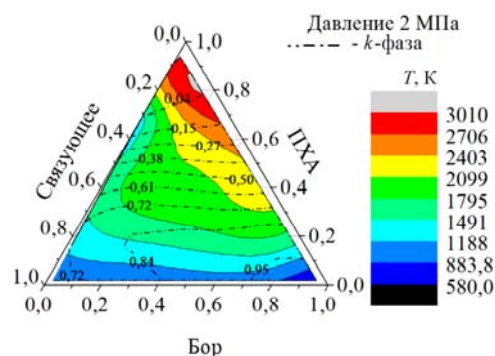


Рис. 1. Зависимость температуры горения и содержания конденсированной фазы от содержания компонентов ЭКС

- экстремальную зависимость конденсированного карбида бора от содержания бора с пиком при 60–70 % бора в пределах содержания связующего 30–40 % (см. рис. 2, д);
- экстремальную зависимость конденсированного нитрида бора от содержания ПХА с пиком при 60 % ПХА в пределах содержания связующего 20–40 % (см. рис. 2, е).

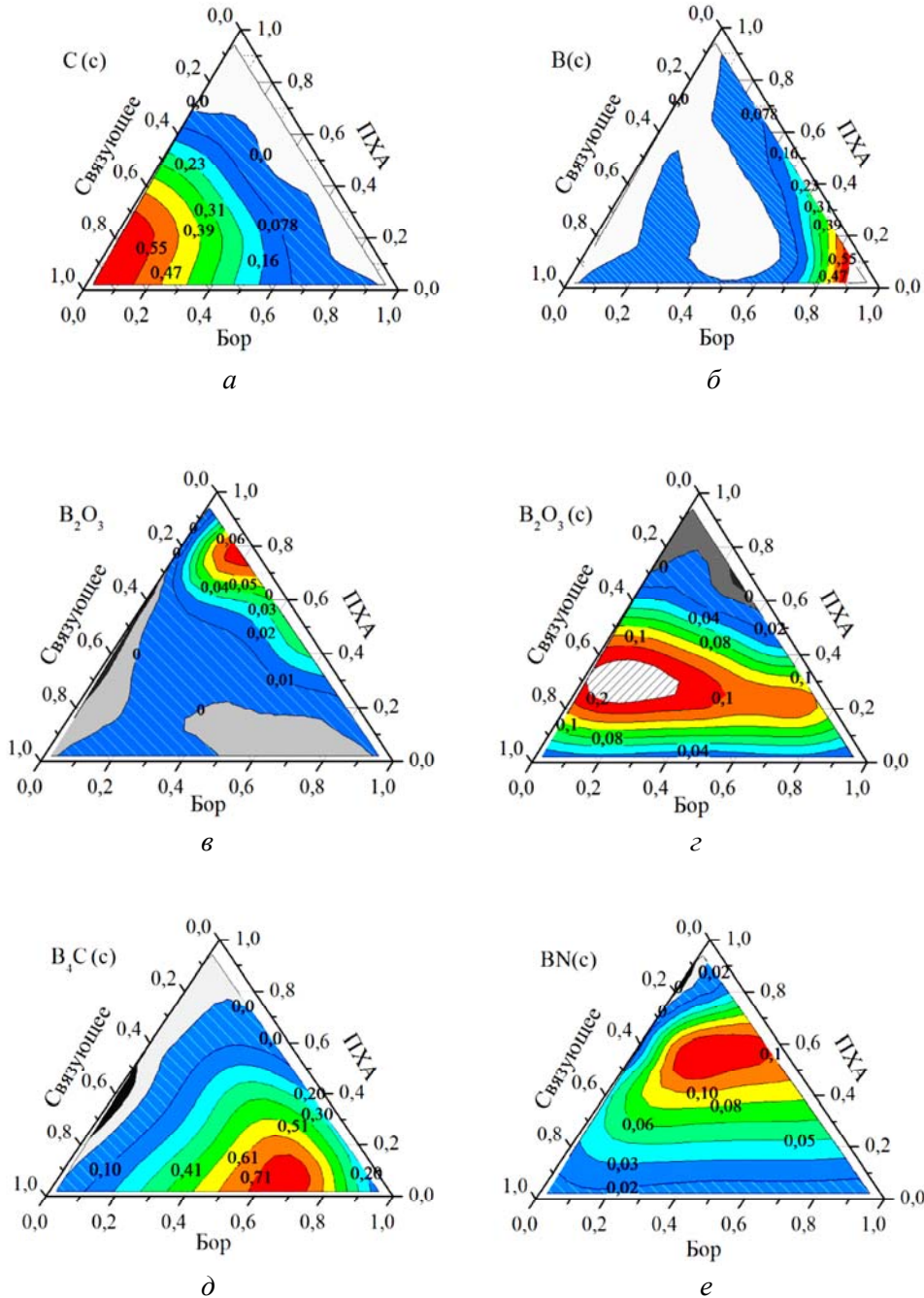


Рис. 2. Содержание компонентов в конденсированной фазе ПГ модельной системы

При горении состава ЭКС с содержанием 15–25 % ПДИ-ЗАК, 20–30 % бора содержание в ПГ следующих компонентов составляет: C(c) – 0–5 %, B(c) – 0–7 %,  $B_2O_3$  – 1–5 %,  $B_2O_3(c)$  – 0–2 %,  $B_4C(c)$  – 0–2 %, BN(c) – 8–13 %.

Прежде всего, соотношение между конденсированным и газообразным оксидом бора зависит от температуры продуктов сгорания. Таким образом, результаты рис. 2, в и рис. 2, г согласуются с представленной температурной зависимостью на рис. 1. Сдвиг в сторону образова-

ния большего количества карбида бора связан с высоким содержанием углеводородного связующего в составе ЭКС, в то время как большее содержание окислителя перхлората аммония приводит к сдвигу в сторону образования в ПГ большего содержания нитрида бора.

В соответствии с результатами термодинамических расчетов трехкомпонентных смесей и с учетом технологических ограничений на состав смесей дальнейшие расчеты проведены для содержания связующего 20 и 25 %. На рис. 3, 4 представлены зависимости температуры горения и содержания конденсированной фазы  $z$  продуктов сгорания модельной системы от содержания бора от 5 до 45 %. Как видно из рис. 3, увеличение давления приводит к повышению температуры горения при содержании связующего 20 и 25 % во всем диапазоне содержания бора, при этом характер зависимости температуры при содержании ПДИ-ЗАК 20 % сложный с двумя экстремумами в районе содержания бора 12–15 %, 32–37 % для всех значений давления (см. рис. 3, *а*). В то время как при 25 % ПДИ-ЗАК экстремум наблюдается один при давлении 0,5; 1,0, 1,5 МПа (см. рис. 3, *б*). При 2,0 МПа зависимость температуры от содержания бора носит W-образный характер с пиками при 2080 и 2066 К при 8 и 12 % бора соответственно. Для состава с 25 % связующего характерно увеличение содержания конденсированной фазы с увеличением давления, в то время как зависимость содержания конденсированной фазы от содержания бора при 20 % ПДИ-ЗАК носит более сложный характер.

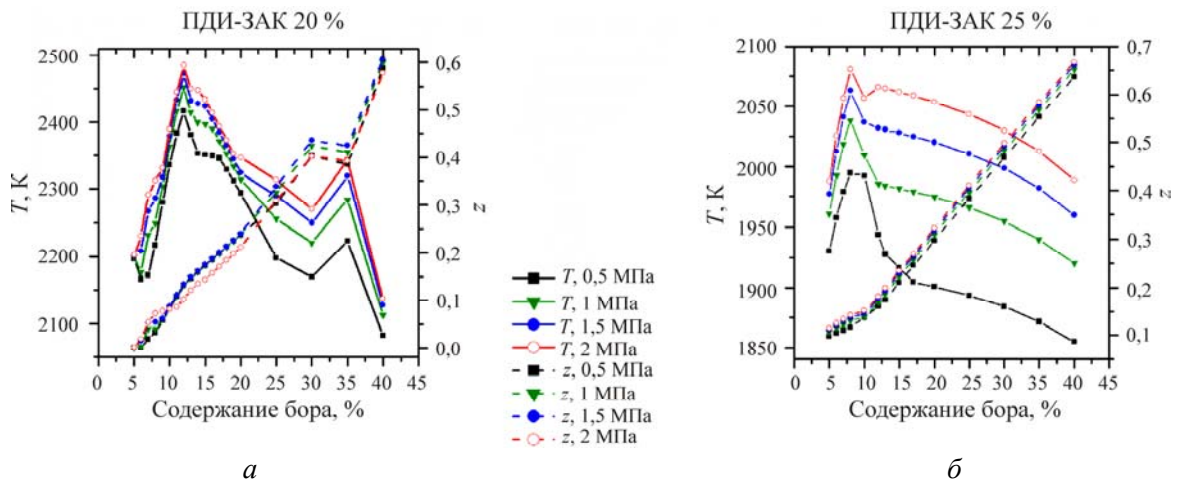


Рис. 3. Зависимость температуры горения и содержания конденсированной фазы продуктов сгорания: *а* – при 20 % ПДИ-ЗАК; *б* – при 25 % ПДИ-ЗАК

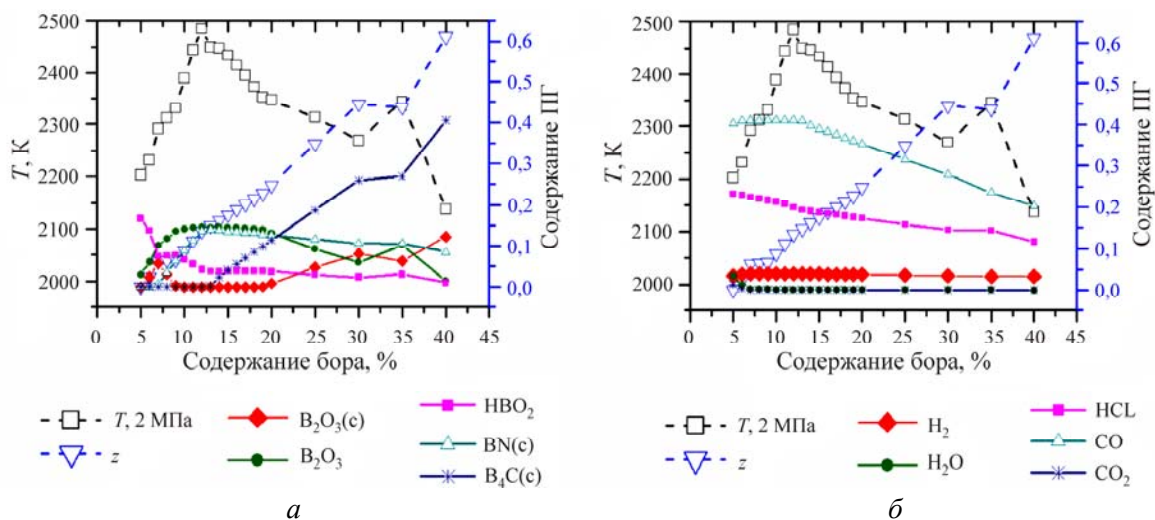
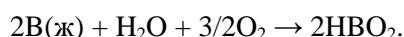
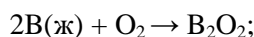


Рис. 4. Зависимость температуры горения от состава борсодержащих продуктов сгорания при 20 % ПДИ-ЗАК и давлении 2 МПа

Для возможно более полного понимания полученных зависимостей на рис. 4 представлены зависимости состава продуктов сгорания при 20 % ПДИ-ЗАК и давлении 2 МПа от содержания бора в модельной системе.

Наибольшее значение температуры сгорания 2484 К при содержании 12 % бора приходится на максимальное содержание в продуктах сгорания оксида бора (0,146 мас. долей в газообразном состоянии) и близкое к максимальному содержанию конденсированного нитрида бора (0,135 мас. долей) при минимальном содержании конденсированных оксида бора и карбида бора. Дальнейший рост содержания бора до 30 % в модельной системе приводит к снижению температуры продуктов сгорания до 2270 К, росту содержания общего количества конденсированной фазы в основном за счет увеличения карбида бора (от 0 до 0,26 мас. долей) и конденсированного оксида бора (до 0,08) и значительному снижению содержания оксида углерода с 0,40 до 0,27 мас. долей. Второй температурный пик при содержании бора 35 % совпадает с некоторым плато по содержанию в продуктах сгорания карбида бора, а также изменением соотношения между окисленным бором в продуктах сгорания с небольшими пиками у борной кислоты и газообразным бором.

Кинетика поверхностных реакций жидкого бора, согласно работе [12], предполагает следующие возможные реакции:



Водяной пар реагирует с оксидным слоем и способствует расходу оксида бора [12]. Поскольку эта реакция является экзотермической, увеличивается общая температура продуктов сгорания.

Дальнейшие расчеты проведены на следующих составах, представленных в таблице.

Обозначение составов

Обозначение состава	Бор	ПХА	ПДИ-ЗАК
В-10-С-25	10	65	25
В-20-С-25	20	55	25
В-30-С-25	30	45	25
В-12-С-20	12	68	20
В-20-С-25	20	60	20
В-30-С-20	35	45	20

В работе [19] представлена методика по оценке эффективности рецептур ТРТ, основанная на их соответствии предъявляемым техническим требованиям по обеспечению заданного уровня термодинамических характеристик, значения которых в значительной мере зависят от состава и свойств продуктов сгорания. Термодинамические и теплофизические характеристики составов ЭКС определены при  $P_k/P_b = 2/0,1$  и  $1/0,1$  МПа и представлены ниже. В результате определялись следующие характеристики ПГ: температура горения  $T$ , К; удельный объем ПГ  $v$ , м<sup>3</sup>/кг; удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг·К); молярная масса газовой фазы  $M$ , г/моль; газовая постоянная  $R_g$ , Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности  $L_t$ , Вт/(м·К); содержание конденсированной фазы  $z$ . Величину работоспособности оценивали по произведению  $RT(1 - z)$  согласно работе [19].

Термодинамические и теплофизические характеристики борсодержащих составов

$P$ , МПа	$T$ , К	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	ММ, г/моль	$R_g$ , Дж/(кг·К)	$L_i$ , Вт/(м·К)	$z$	$RT(1 - z)$ , кДж/кг
<b>Состав В-10-С-25</b>								
2/0,1	2188	5,65	2,05	16,02	518	0,25	0,28	816
1/0,1	2144	6,36	2,08	16,11	514	0,28	0,27	793
<b>Состав В-20-С-25</b>								
2/0,1	2066	5,34	2,23	14,44	575	0,32	0,46	641
1/0,1	2004	5,56	2,22	14,91	556	0,31	0,42	646
<b>Состав В-30-С-25</b>								
2/0,1	2042	4,48	2,37	12,81	649	0,35	0,59	543
1/0,1	1964	4,67	2,35	13,34	623	0,33	0,56	538
<b>Состав В-12-С-20</b>								
2/0,1	2484	6,35	2,03	17,13	485	0,28	0,29	855
1/0,1	2452	6,79	2,02	18,11	459	0,29	0,24	855
<b>Состав В-20-С-20</b>								
2/0,1	2346	5,63	2,14	16,20	513	0,30	0,40	722
1/0,1	2313	6,02	2,14	16,98	489	0,30	0,36	723
<b>Состав В-30-С-20</b>								
2/0,1	2212	4,12	2,31	14,19	585	0,32	0,58	543
1/0,1	2175	4,49	2,33	14,48	574	0,33	0,57	536

Анализ данных характеристик показывает, что зависимость термодинамических и теплофизических параметров от давления в камере сгорания для представленных составов непрямолинейна. Для каждого состава наблюдается рост содержания конденсированной фазы в ПГ и температуры при увеличении давления. К наиболее эффективным с точки зрения работоспособности можно отнести составы В-10-С-25, В-12-С-20 с величиной  $RT(1 - z)$  816 и 855 кДж/кг соответственно.

Для дальнейших экспериментальных исследований процессов горения борсодержащих конденсированных систем предполагается использование коммерческого порошка аморфного бора марки В производства АО «УНИХИМ с ОЗ» (ТУ 2112-001-49-53-4204-2003). Содержание магния в данном порошке согласно ТУ регламентируется в пределах не более 15 %.

На основе вышеприведенных термодинамических расчетов примем за оптимальный состав композицию В-12-С-20, содержащую 12 % бора, 20 % связующего, 68 % перхлората аммония.

Далее изучено влияние замены части бора на магний. Результаты представлены на рис. 5, где в пределах от 1 до 5 % произведена замена в абсолютном значении бора на магний, что соответствует следующему содержанию магния в порошке бора: 0; 8,3; 16,7; 25; 33,3; 41,7 %. Как видно из данного графика (см. рис. 5), замена бора на магний влияет на величину температуры горения, снижая ее с 2485 до 2305 К. Также происходит заметное изменение состава продуктов сгорания. Равновесие сдвигается в сторону меньшего образования нитрида бора, снижая общее количество конденсированной фазы в ПГ, с одновременным появлением в продуктах сгорания хлорида магния.

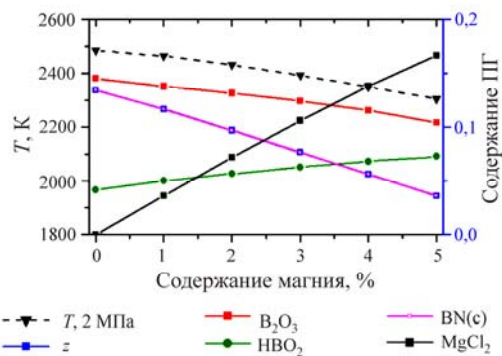


Рис. 5. Зависимость температуры горения и состава продуктов сгорания от содержания магния для состава В-12-С-20 при давлении 2 МПа

Кроме этого, происходит сдвиг с образованием большего количества  $\text{HBO}_2$  и снижением оксида бора. Учитывая о том, что реакция образования  $\text{HBO}_2$  является экзотермической и увеличивает температуру частиц, можно предположить, что в случае экспериментальных исследований горения энергетических конденсированных систем наличие некоторого количества магния будет способствовать воспламенению частиц бора. Данные результаты будут учтены в дальнейших экспериментальных исследованиях по горению борсодержащих ЭКС при модификации порошков бора фторсодержащими соединениями и регулировании содержания магния в составе порошка бора марки В обработкой различными растворителями.

### Выводы

Выполнены термодинамические расчеты борсодержащих энергетических конденсированных систем с использованием программного комплекса TERRA. Неравновесность процесса горения исследуемых ЭКС смоделирована исключением из базы данных продуктов сгорания веществ, которые не успеют образоваться из-за недостаточности времени пребывания в первой зоне ПВРД.

Установлено, что увеличение в продуктах сгорания  $\text{HBO}_2$  приводит к нелинейной зависимости температуры продуктов сгорания от содержания бора в модельной системе ЭКС.

Показано, что неоднозначное влияние магния в составе выбранной системы ЭКС на термодинамические характеристики продуктов сгорания требует дальнейших экспериментальных исследований с целью подтверждения полученных закономерностей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00170.*

### Библиографический список

1. Егоров А.Г., Тизилов А.С. Перспективы и проблемы создания двигательных и энергетических установок на порошкообразном металлическом горючем // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2011. – № 3(27). – С. 277–281.
2. Experimental investigation of the combustion products in an aluminised solid propellant / Z. Liu, Sh. Li, M. Liu, D. Guan, X. Sui, N. Wang // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 133. – P. 136–144. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.025> (accessed 25 November 2019).
3. Влияние поверхностной модификации микро- и нанодисперсных порошков алюминия на реологические свойства олигодиеуретановой композиции / Е.А. Лебедева, К.О. Ухин, С.А. Астафьева, В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников // Перспективные материалы. – 2014. – № 3. – С. 72–77.
4. Agglomeration of the condensed phase of energetic condensed systems containing modified aluminum / E.A. Lebedeva, I.L. Tutubalina, V.A. Valtsifer, V.N. Strelnikov, S.A. Astafeva, I.V. Beketov // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2012. – Vol. 48, no. 6. – P. 694–698.
5. Демидов С.С., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Рекомендации по проектированию ракетного двигателя на порошкообразном алюминиевом горючем и вземном окислителе // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2016. – Т. 1. – С. 27–31.
6. Combustion behavior and thermophysical properties of metal-based solid fuels / D.M. Chen, W.H. Hsieh, T.S. Snyder, V. Yang, T.A. Litzinger, K.K. Kuo // J. of Propulsion and Power. – 1991. – Vol. 7. – P. 250–257.
7. Foelsche R.O., Burton R.L., Krier H. Boron particle ignition and combustion at 30-150 ATM // Combustion and Flame. – 1999. – Vol. 117. – P. 32–58.
8. Yeh C.L., Kuo K.K. Ignition and combustion of boron particles // Progress in Energy and Combustion Science. – 1996. – Vol. 22. – P. 511–541.
9. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / В.Н. Александров, В.М. Быцкевич, В.К. Верховоломов [и др.]; под ред. Л.С. Яновского. – М.: Академкнига, 2006. – 343 с.
10. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах / В.Ю. Александров, К.Ю. Арефьев,



А.Н. Прохоров, К.В. Федотова, М.С. Шаров, Л.С. Яновский // Изв. вузов. Машиностроение. – 2016. – № 2(671). – С. 65–75. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75

11. Демидов С.С., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Моделирование воспламенения порошка алюминия, распределенного в газовом потоке с высоким содержанием кислорода // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 73–87. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.04

12. Kalpakli B., Bedig Acar E., Ulas A. Improved combustion model of boron particles for ducted rocket combustion chambers // Combustion and Flame. – 2017. – Vol. 179. – P. 267–279. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.015> (accessed 25 November 2019).

13. Яновский Л.С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. – М.: Академкнига, 2006. – 343 с.

14. Проектирование газогенератора ракетно-прямоточного двигателя с заданной расходной характеристикой / В.В. Ветров, Н.Ш. Гафуров, В.В. Морозов, П.Д. Шилин, Н.С. Чулков // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 12, ч. 2. – С. 417–425.

15. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Наука и инновации. – 2012. – № 1. – С. 21. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31

16. Дорофеев А.А., Ягодников Д.А. Термодинамическое моделирование состава и характеристик продуктов сгорания переобогащенных жидких ракетных топлив в режиме закалки [Электронный ресурс] // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56, № 2. – С. 270–276. – URL: <https://doi.org/10.7868/S0040364418020151> (дата обращения: 25.11.2019).

17. Лебедева Е.А., Астафьева С.А. Изучение конденсированной фазы продуктов сгорания борсодержащих энергетических конденсированных систем // Техническая химия. От теории к практике: тез. докл. VI Всерос. конф. с междунар. участием, г. Пермь. – Пермь, 2019. – С. 44.

18. Решетников С.М., Фролов В.М. Макрокинетика горения и микроструктура смесового ракетного топлива (модель локального анизотропного распределения связующего): монография / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2019. – 274 с.

19. Исследование термодинамических характеристик пиротехнических газогенерирующих составов для низкотемпературных газогенераторов / С.В. Калинин, А.И. Шабунин, В.И. Сарабьев, В.А. Валяев, М.В. Хрисанфов, А.С. Егорова // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 44–46.

## References

1. Yegorov A.G., Tizilov A.S. Perspektivy i problemy sozdaniya dvigatel'nykh i energeticheskikh ustanovok na poroshkoobraznom metallicheskom goryuchem [Prospects and problems of creating propulsion and power plants using powdered metal fuel]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, № 3(27), 2011, pp. 277-281.

2. Experimental investigation of the combustion products in an aluminised solid propellant / Zhu Liu, Shipeng Li, Mengying Liu, Dian Guan, Xin Sui, Ningfei Wang // Acta Astronautica, V. 133, 2017, pp. 136-144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.025> (Application date: 25.11.2019).

3. Lebedeva Ye.A., Ukhin K.O., Astafyeva S.A., Valtsifer V.A., Strelnikov V.N. Vliyaniye poverkhnostnoy modifikatsii mikro- i nanodispersnykh poroshkovaluminiya na reologicheskiye svoystva oligodiyenuretanovoy kompozitsii [The effect of surface modification of micro- and nanodispersed aluminum powders on the rheological properties of oligodienurethane compositions]. Perspektivnye Materialy, 2014, № 3, pp. 72-77.

4. Lebedeva E.A., Tutubalina I.L., Valtsifer V.A., Strelnikov V.N., Astafeva S.A., Beketov I.V. Agglomeration of the condensed phase of energetic condensed systems containing modified aluminum. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 694-698.

5. Demidov S.S., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Rekomendatsii po proyektirovaniyu raketnogo dvigatelya na poroshkoobraznom alyuminiyevom goryuchem i vnezemnom okislitele [Recommendations for the design of a rocket engine on a powdered aluminum fuel and extraterrestrial oxidizer]. Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokiye tekhnologii i innovatsii, 2016, vol. 1, pp. 27-31. eLIBRARY ID: 28146860.

6. Combustion behavior and thermophysical properties of metal-based solid fuels / Chen D.M., Hsieh W.H., Snyder T.S., Yang V., Litzinger T.A., Kuo K.K. // Journal of Propulsion and Power, Vol. 7, 1991, pp. 250-257.

7. Boron particle ignition and combustion at 30-150 ATM / Foelsche R.O., Burton R.L., Krier H. // *Combustion and Flame*, Vol. 117, 1999, pp. 32-58.
8. Ignition and combustion of boron particles / Yeh C.L., Kuo K.K. // *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, 1996, pp. 511-541.
9. Aleksandrov V.N., Bytskevich V.M., Verkholomov V.K. i dr. Integralnyye pryamotochnyye vozdušno-reaktivnyye dvigateli na tverdykh toplivakh. Osnovy teorii i rascheta [Integrated ramjet engines using solid fuels. Fundamentals of theory and calculation]. Moscow: *Akademkniga*, 2006, 343 p.
10. Aleksandrov V.Yu., Arefyev K.Yu., Prokhorov A.N., Fedotova K.V., Sharov M.S., Yanovskiy L.S. Metodika eksperimentalnykh issledovaniy effektivnosti rabocheho protsessa v vysokoskorostnykh PVRD gazogeneratornoy skhemy na tverdykh toplivakh [The methodology of experimental studies of the efficiency of the working process in high-speed ramjet engine gas generation scheme for solid fuels]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 2(671), pp. 65-75. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75
11. Demidov S.S., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Modelirovaniye vosplamneniya poroshka alyuminiya, raspredelenno v gazovom potoke s vysokim sodержaniyem kisloroda [Modeling the ignition of aluminum powder distributed in a gas stream with a high oxygen content]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 46, pp. 73-87. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.04
12. Improved combustion model of boron particles for ducted rocket combustion chambers / Bora Kalpakli, Emir Bedig Acar, Abdullah Ulas // *Combustion and Flame*, Vol. 179, 2017, pp. 267-279. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.015> (Application date: 25.11.2019).
13. Yanovskiy L.S. Integralnyye pryamotochnyye vozdušno-reaktivnyye dvigateli na tverdykh toplivakh [Integrated ramjet engines for solid fuels]. Moscow: *Akademkniga*, 2006, 343 p.
14. Vetrov V.V., Gafurov N.SH., Morozov V.V., Shilin P.D., Chulkov N.S. Proyektirovaniye gazogeneratora raketno-pryamotochnogo dvigatelya s zadannoy raskhodnoy kharakteristikoy [Designing a gas generator of a ramjet engine with a given flow characteristic]. *Izvestiya Tula State University*, 2017, no. 12, Ch. 2, pp. 417-425.
15. Trusov B.G. Programmaya sistema modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh [Program system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 1, pp. 21. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31.
16. Dorofeyev A. A., Yagodnikov D. A. Termodinamicheskoye modelirovaniye sostava i kharakteristik produktov sgoraniya pereobogashchennykh zhidkikh raketnykh topliv v rezhime zakalki [Thermodynamic modeling of the composition and characteristics of the products of combustion of re-enriched liquid rocket fuels in the hardening mode]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 270-276. URL: <https://doi.org/10.7868/S0040364418020151> (Application date: 25.11.2019).
17. Lebedeva Ye.A., Astafyeva S.A. Izucheniye kondensirovannoy fazy produktov sgoraniya borsoderzhashchikh energeticheskikh kondensirovannykh sistem [Studying the condensed phase of the combustion products of boron-containing energetic condensed systems]. *Abstracts of the VI All-Russian Conference with International Participation «Tekhnicheskaya khimiya. Ot teorii k praktike»*, Perm, 2019, P. 44.
18. Reshetnikov S.M., Frolov V.M. Makrokinetika goreniya i mikrostruktura smesevogo raketnogo topliva (model lokalnogo anizotropnogo raspredeleniya svyazuyushchego) [Combustion rocket macrokinetics and mixed rocket microstructure (model of local anisotropic binder distribution)]. Kirov: Vyatka State University, 2019, 274 p.
19. Kalinin S.V., Shabunin A.I., Sarabyev V.I., Valyayev V.A., Khrisanfov M.V., Yegorova A.S. Issledovaniye termodinamicheskikh kharakteristik pirotekhnicheskikh gazogeneriruyushchikh sostavov dlya nizkotemperaturnykh gazogeneratorov [Investigation of the thermodynamic characteristics of pyrotechnic gas-generating compositions for low-temperature gas generators]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 44-46.

#### Об авторах

**Лебедева Елена Анатольевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 3, e-mail: itch.elena@mail.ru).

**Астафьева Светлана Асылхановна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, завлабораторией структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 3; e-mail: svetlana-astafeva@yandex.ru).

### About the authors

**Elena A. Lebedeva** (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Researcher, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (3, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: itch.elena@mail.ru).

**Svetlana A. Astafeva** (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Head of the Laboratory of Structural and Chemical Modification of Polymers, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (3, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: svetlana-astafeva@yandex.ru).

Получено 26.11.2019