



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.454, 536.7

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

^{1,2}Золоторёв Н.Н., ¹Перфильева К.Г.

¹ФГАОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Томск, Россия, (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36), e-mail: nikzolotorev@mail.ru

²ФГБУН «ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ» СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН, Новосибирск, Россия, (630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1)

При выборе компонентов твердотопливного заряда на этапе его проектирования проводят численное моделирование физико-химических процессов горения. Расчет основных характеристик горения твердого топлива позволяет оценить эффективность без проведения дорогостоящих экспериментов. В настоящей работе представлены результаты термодинамических расчетов горения перспективных твердых топлив с содержанием различных высокоэнергетических добавок. Проведена оценка влияния массового количества высокоэнергетической добавки на баллистические характеристики. Приведены значения основных характеристик адиабатической температуры горения, удельного импульса тяги, молярной массы газовой фазы и массовой доли конденсированных продуктов сгорания.

Ключевые слова: Термодинамика, горение, твердое топливо, газогенератор, порошки металлов.

CALCULATION OF THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMBUSTION OF SOLID PROPELLANT WITH HIGH-ENERGY ADDITIVES

^{1,2}Zolotorev N.N., ¹Perfilyeva K.G.

¹"NATIONAL RESEARCH TOMSK STATE UNIVERSITY", Tomsk, Russia, (634050, Tomsk, Lenin Ave., 36), e-mail: nikzolotorev@mail.ru

²INSTITUTE OF THERMOPHYSICS. S.S. KUTATELADZE" OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, Novosibirsk, Russia, (630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev Ave., 1)

When selecting the components of a solid propellant charge at the design stage, numerical modeling of physical and chemical combustion processes is carried out. Calculation of the main combustion characteristics of solid fuel allows one to evaluate the efficiency without conducting expensive experiments. This work presents the results of thermodynamic calculations of the combustion of promising solid fuels containing various high-energy additives. The influence of the mass amount of high-energy additive on ballistic characteristics was assessed. The values of the main characteristics of the adiabatic combustion temperature, specific impulse, molar mass of the gas phase and mass fraction of condensed combustion products are given.

Keywords: Thermodynamics, combustion, solid propellant, gas generator, metal powders.

Одним из основных направлений развития газогенераторов широкого назначения является поиск новых высокоэффективных энергетических добавок. По мере развития техники более широкое применение находят газогенераторы, работающие на твердом топливе. Область применения таких газогенераторов в основном направлена на создание тяги ракетных двигателей на твердом топливе. Однако твердотопливные газогенераторы находят применение в ряде прикладных задачах и широко используются в качестве источника газообразных продуктов сгорания для подъема затонувших объектов, газогенераторы автомобильных подушек безопасности и т.д. Добавление в состав твердотопливного заряда металлического горючего значительно улучшает энергетические характеристики [1–4]. Применение металлосодержащих высокоэнергетических материалов в газогенераторах, в общем случае приводят к гетерогенному горению твердотопливного заряда и образованию конденсированных компонентов продуктов сгорания, что значительно усложняет процесс горения и истечения продуктов сгорания. Одним из перспективных направлений повышения эффективности является внедрение в состав твердотопливного заряда новых энергетических наполнителей обладающих высокими теплофизическими характеристиками. Анализ научно-технической литературы в области металлургии показал, что благодаря современным методам и устройствам можно получать порошки металлов различной дисперсности [5]. Обработка порошковой смеси в высокоскоростных планетарных шаровых мельницах и других устройствах, позволяет получить новые высокоэнергетические добавки порошков металла и их соединений [6, 7]. Полученные новые порошки металлов обладают рядом преимуществ перед классическими мелкодисперсными порошками металлов. Полученные новые механически активированные порошки и смеси, могут быть использованы при создании твердотопливного заряда для газогенераторов.

Применение порошков алюминия, бора, магния и их соединений в виде диборида алюминия, додекаборида алюминия и диборида титана в смесевом твердом топливе являются определяющими для значительного повышения основных характеристик твердого топлива [8–12]. Использование современных электронно-вычислительных машин и специализированных программных комплексов позволяет проводить серии термодинамических и теплофизических расчетов продуктов сгорания заданного компонентного состава. Применение программных комплексов на стадии подбора и определения оптимального количества высокоэнергетических добавок, в составе твердого топлива, избавляет от необходимости проведения длительных и дорогостоящих экспериментов, как модельных так и натуральных, и таким образом, существенно сокращает экономические затраты и сроки разработки.

Для оценки влияния высокоэнергетических добавок и процентного содержания в смесевом твердом топливе использовался отечественный программный комплекс «TERRA» [13]. Результаты термодинамических расчетов позволяют определить адиабатическую температуру горения, удельный импульс тяги, молярную массу газовой фазы и массовую долю конденсированных продуктов сгорания.

Расчет термодинамических характеристик проводился для смесевых твердых топлив, содержащих в качестве горючего-связующего бутадиеновый каучук, пластифицированный трансформаторным маслом (СКДМ-80), окислитель – перхлорат аммония (NH_4ClO_4) [14] и высокоэнергетические добавки с разным процентным содержанием. Содержание высокоэнергетических добавок (Al , B , Mg , AlB_2 , AlB_{12} , TiB_2) во всех исследуемых

композициях варьировалось от 5 до 20 мас. %, что соответствует оптимальному значению для смесевых твердых топлив. Содержание высокоэнергетических добавок свыше 20 мас. % в твердом топливе приводит к неэффективности из-за роста потерь удельного импульса тяги, связанных с двухфазностью потока продуктов сгорания [15]. Расчеты проводились для равновесного истечения газа при соотношении давлений в камере сгорания и на срезе сопла 40:1. Коэффициент избытка окислителя для всех рассмотренных составов составлял $\alpha = 0.5$. Выбор значения α обусловлен требованиями технологии изготовления вязкой массы смесевых твердых топлив и эксплуатационными характеристиками отвержденных образцов твердого топлива.

На Рисунках 1 и 2 приведены основные зависимости теплофизических и термодинамических характеристик от массового содержания высокоэнергетических добавок.

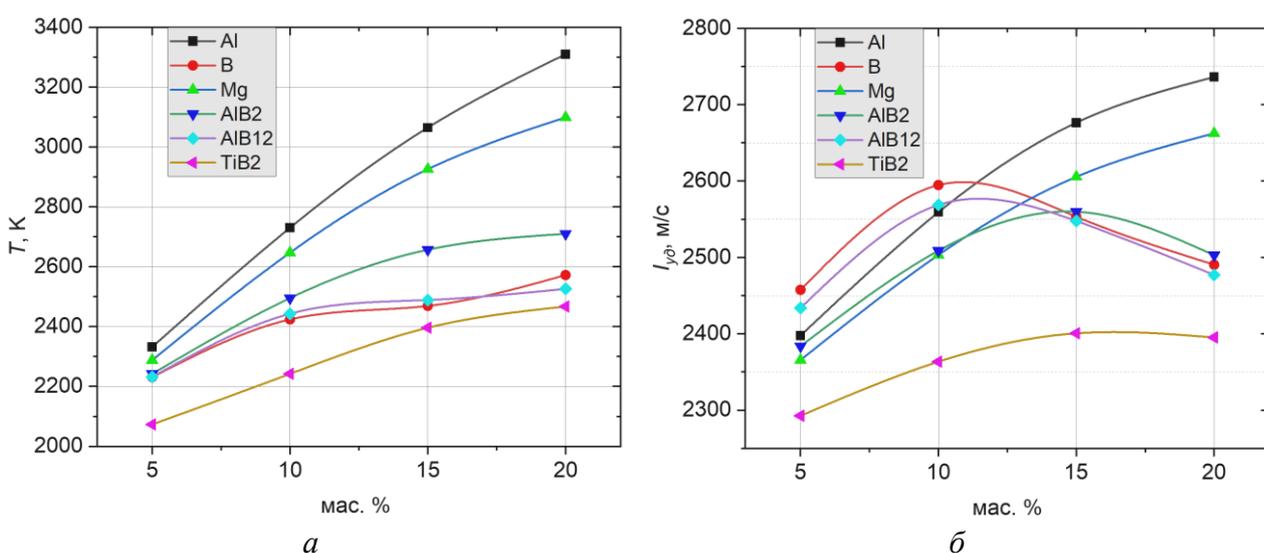


Рисунок 1 – Влияние высокоэнергетических добавок на изменение адиабатической температуры горения a и удельного импульса тяги b

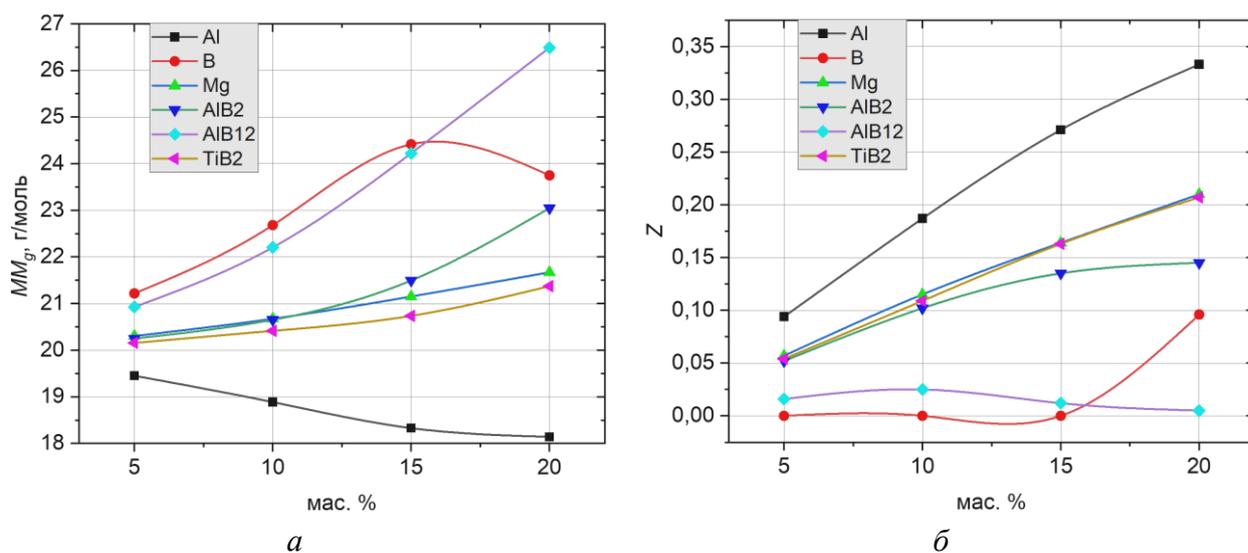


Рисунок 2 – Влияние высокоэнергетических добавок на изменение молярной массы газовой фазы a и конденсированных продуктов сгорания b

Результаты расчетов показали, что добавление алюминия и магния в состав твердого топлива повышает удельный импульс тяги, однако это приводит к росту адиабатической температуры горения и значительному увеличению массовой доли конденсированных продуктов сгорания. Образование большого количества конденсированных продуктов сгорания может негативно повлиять на физико-химические процессы при горении твердого топлива в камере сгорания. Добавление большого количества высокоэнергетических добавок приводит не только к потере удельного импульса тяги, но и к уменьшению содержания горючего-связующего от общей массы твердого топлива. Низкое содержание горючего-связующего, приводит к увеличению плотности смесового твердого топлива и одновременно ухудшает его технологические свойства и физико-механические характеристики [15].

Добавление бора и додекаборида алюминия в количестве 10 мас. % приводит к максимальному значению удельного импульса тяги по сравнению с остальными добавками при том же количестве. Однако повышение содержания этих добавок свыше 10 мас. % приводит к снижению удельного импульса тяги. Содержание бора и додекаборида алюминия в количестве 10 мас. % приводит к минимальному количеству массовой доли конденсированных продуктов сгорания.

Композициям, содержащим диборид алюминия и диборид титана в составе твердого топлива после добавления свыше 15 мас. % приводит к снижению удельного импульса тяги, росту адиабатической температуры горения и молярной массы газовой фазы, а также увеличению массовой доли конденсированных продуктов сгорания.

Анализ результатов термодинамических расчетов позволил выбрать ряд модельных составов перспективных смесевых твердых топлив для дальнейшего проведения экспериментальных исследований по их зажиганию и горению. Компонентное содержание окислителя, горючего-связующего и высокоэнергетических добавок в модельных образцах приведено в Таблице 1.

Таблица 1 – Перспективные составы смесевых твердых топлив

Индекс состава	Содержание компонентов, мас. %							
	Окислитель	Горючее-связующее	Энергетические добавки					
	NH_4ClO_4	СКДМ-80	Al	Mg	B	AlB_2	AlB_{12}	TiB_2
A1	69.2	15.8	15	–	–	–	–	–
A2	69.6	15.4	–	15	–	–	–	–
A3	75.2	14.8	–	–	10	–	–	–
A4	71.3	13.7	–	–	–	15	–	–
A5	74.7	15.3	–	–	–	–	10	–
A6	70.1	14.9	–	–	–	–	–	15

Приведенные в Таблице 1 составы смесевых твердых топлив характеризуются достаточно высокими значениями удельного импульса тяги и пониженным содержанием конденсированных продуктов сгорания.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых - кандидатов наук (проект № МК-2463.2022.4).

Список литературы

1. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Теплов Д.В., Архипов В.А. Характеристики горения высокоэнергетического материала, содержащего дисперсный алюминий, бор и бориды алюминия // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59, № 4. – С. 52-59.
2. Архипов В.А., Жуков А.С., Кузнецов В.Т., Золоторёв Н.Н., Осипова Н.А., Перфильева К.Г. Характеристики зажигания и горения конденсированных систем с энергетическими наполнителями // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 6. – С. 68-77.
3. Коротких А.Г., Архипов В.А., Попенко Е.М., Громов А.А. Горение нанопорошков алюминия в составе энергетических конденсированных систем // Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах. – 2007. – С. 172-215.
4. Архипов В.А., Коротких А.Г., Громов А.А., Кузнецов В.Т., Пестерев А.В., Евсеенко И.А. Влияние каталитических добавок порошков металлов на зажигание высокоэнергетических материалов // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11-3. – С. 299-306.
5. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Лернер М.И. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // Цветные металлы. – 2006. – № 4. – С. 58-64.
6. Sokolov S., Dubkova Y., Vorozhtsov A., Kuznetsov V., Promakhov V., Zhukov I. Effect of mechanical activation duration on combustion parameters of Al-Mg-based high-energy systems // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 243. – P. 00013.
7. Соколов С.Д., Жуков И.А., Дубкова Я.А. Синтез и исследование свойств порошковых материалов системы Al-Mg // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение (HEMs-2018). – 2018. – С. 193-196.

8. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G., Zhao F. Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects. (Editor: Pang W.). – CRC Press, Taylor & Francis Group, an Informa Group company, 2019. – 323 p.
9. Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 37-63.
10. Александров В.Н., Яновский Л.С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета. – М.: Академкнига, 2006. – 343 с.
11. Лемперт Д.Б., Нечипоренко Г.Н., Долганова Г.П., Стесик Л.Н. Зависимость удельного импульса оптимизированных составов смесового твердого ракетного топлива (связующее+металл+окислитель) от природы металла и окислителя // Химическая физика. – 1998. – Т. 17, № 7. – С. 114-120.
12. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
13. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
14. Макеева Л.Н. Перхлорат аммония // Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / Под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С. 351-353.
15. Ягодников Д.А., Андреев Е.А., Эйхенвальд В.Н., Козлов В.А. Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе: Методические указания к выполнению курсового и дипломного проекта по специализации «Ракетные двигатели твердого топлива» / Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 106 с.

References

1. Korotkikh A.G., Sorokin I.V., Teplov D.V., Arkhipov V.A. Kharakteristiki gorenija vysokoenergeticheskogo materiala, razdeleniya dispersnogo alyuminiya, borov i boridov alyuminiya // Fizika gorenija i vzryva. – 2023. – Т. 59, № 4. – pp. 52-59.
2. Arkhipov V.A., Zhukov A.S., Kuznetsov V.T., Zolotorev N.N., Osipova N.A., Perfil'yeva K.G. Kharakteristiki vozgoraniya i gorenija kondensirovannykh s energeticheskimi napolnitelyami//Fizika gorenija i vzryva. – 2018. – Т. 54, № 6. – pp. 68-77.
3. Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Popenko Ye.M., Gromov A.A. Gorenije nanoporoshkov vkluchayetsya v sostav struktur kondensirovannykh sistem // Fizika i khimiya gorenija nanoporoshkov metallov v azotsoderzhashchikh gazovykh sredakh. – 2007. – pp. 172-215.
4. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G., Gromov A.A., Kuznetsov V.T., Pesterev A.V., Yevseyenko I.A. Issledovaniye kataliticheskikh dobavok poroshkov metallov na zazhiganiye vysokoenergeticheskikh materialov // Izvestiya vuzov. Fizika. – 2011. – Т. 54, № 11-3. – pp. 299-306.
5. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Korotkikh A.G., Lerner M.I. Tekhnologiya polucheniya i dispersnyye kharakteristiki nanoporoshkov vliyayut // Tsvetnyye metally. – 2006. – № 4. – pp. 58-64.

6. Sokolov S., Dubkova YU., Vorozhtsov A., Kuznetsov V., Promakhov V., Zhukov I. Vliyaniye prodolzhitel'nosti mekhanicheskoy aktivatsii na parametry goreniya vysokoenergeticheskikh sistem na osnove Al-Mg // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Т. 243. – p. 00013.
 7. Sokolov S.D., Zhukov I.A., Dubkova YA.A. Sintez i issledovaniye poroshkovykh svoystv materialov Al-Mg // Vysokoenergeticheskiye i spetsial'nyye materialy: demilitarizatsiya, antiterrorizm i grazhdanskoye primeneniye (HEMs-2018). – 2018. – pp. 193-196.
 8. Pang V., De Luka L.T., Fan' S., Glotov O.G., Chzhao F. Toplivnoye toplivo na osnove bora: svoystva, goreniye i tekhnologicheskkiye aspekty. (Redaktor: Pang V.). – CRC Press, Taylor & Francisco Group, kompaniya Informa Group, 2019. – p.323.
 9. Sandaram D., Yang V., Zarko V.Ye. Goreniye nanochastits vozdeystvuyet (obzor) // Fizika goreniya i vzryva. – 2015. – Т. 51, № 2. – pp. 37-63.
 10. Aleksandrov V.N., Yanovskiy L.S. Integral'nyye pryamotochnyye vozdukhoreaktivnyye dvigateli na legkikh toplivakh. Osnovy teorii i rascheta. – M.: Akademkniga, 2006. – p.343.
 11. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Dolganova G.P., Stesik L.N. Zavisimost' udel'nogo impul'sa agressivnykh sostavov smesevogo tverdogo raketnogo topliva (svyazuyushcheye+metall+okislitel') ot prirody metalla i okislitelya // Khimicheskaya fizika. – 1998. – Т. 17, № 7. – pp. 114-120.
 12. Yerokhin B.T. Teoriya vnutrikamernykh protsessov i proyektirovaniye RDTT. – M.: Mashinostroyeniye, 1991. – p.560.
 13. Belov G.V., Trusov B.G. Termodinamicheskoye modelirovaniye khimicheskikh reagiruyushchikh sistem. – M.: MGTU imeni N.E. Baumana, 2013. – p.96.
 14. Makeyeva L.N. Perkhlorat ammiaka // Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar'. Energeticheskiye kondensatsionnyye sistemy / Pod red. B.P. Zhukova. – M.: Yanus-K, 1999. – pp. 351-353.
 15. Yagodnikov D.A., Andreyev Ye.A., Eykhenva'l'd V.N., Kozlov V.A. Osnovy proyektirovaniya raketnykh dvigatel'nykh ustanovok na tverdom toplive: Metodicheskiye ukazaniya k vypolneniyu kursovogo i diplomnogo proyekta po spetsializatsii «Raketnyye dvigateli tverdogo topliva» / Pod red. D.A. Yagodnikova. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. – p.106.
-