

Оценка влияния перепуска воздуха по длине камеры дожигания на эффективность рабочего процесса в модельной установке с энергоемкими конденсированными материалами

Суриков Е.В., Шаров М.С., Коломенцев П.А., Алексеева О.М.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: mssharov@ciam.ru

Процесс двухзонного горения является одним из эффективных способов организации дожигания продуктов газогенерации, содержащих большое количество конденсированной фазы. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния нескольких вариантов перераспределения подвода воздуха в камеру дожигания модельной установки на коэффициент полноты сгорания. Показана область режимов работы камеры дожигания модельной установки, в которой указанные способы показали хорошую эффективность.

Ключевые слова: модельная камера дожигания, распределенный подвод воздуха, коэффициент полноты сгорания, энергоемкий конденсированный материал

Estimation of the influence of air bypass along the length of the combustion chamber on efficiency of operating process in a model rig with energy-intensive condensed materials

Surikov E.V., Sharov M.S., Kolomentsev P.A., Alekseeva O.M.

CIAM, Moscow

The two-zone burning process is one of the most effective ways to organize the afterburning of gas generation products containing a large amount of condensed phase. Results of experimental research on the influence of several options for redistributing air supply to the model rig's combustion chamber on the value of combustion efficiency are presented. The range of operation modes of the model rig's combustion chamber is shown, where the presented methods have shown good efficiency.

Keywords: model combustion chamber, distributed air supply, combustion efficiency, energy-intensive condensed material

Введение

В настоящее время комбинированные силовые установки (КСУ) газогенераторной схемы активно рассматриваются в качестве силовых установок для высоко-скоростных летательных аппаратов [1–3].

В таких КСУ продукты газогенерации, богатые горючими компонентами, поступают из газогенератора через узел распределения в камеру дожигания (КД), в которой происходит процесс их горения (дожигания) в воздушном потоке, поступающем из каналов воздухозаборного устройства (ВЗУ).

Для повышения энергетических характеристик и плотности смесевых конденсированных материалов для комбинированных силовых установок газогенераторной схемы применяют различные металлы, обладающие высоким энергетическим потенциалом [4–8].

Основной проблемой, с которой сталкиваются при разработке КСУ газогенераторной схемы, работающей на энергоемких конденсированных материалах (ЭКМ) с высокоэнергетическими металлизированными компонентами, является сложность обеспечения эффективного процесса дожигания продуктов ЭКМ, содержащих большое количество конденсированной фазы [1–3; 8].

Реализация энергетических возможностей металлического горючего, входящего в состав ЭКМ, может быть затруднена в условиях габаритных ограничений на силовую установку (СУ). Основные причины неполного сгорания, в частности металлсодержащих компонентов продуктов газогенерации ЭКМ, связанные со значительными сложностями воспламенения и горения частиц конденсированной фазы, в настоящее время хорошо изучены [3; 5–9].

Проблеме повышения эффективности рабочего процесса дожигания продуктов газогенерации ЭКМ с высоким содержанием металлизированной конденсированной фазы в КД и оптимизации геометрических характеристик камеры посвящено большое количество публикаций [2; 3; 7–15], что подтверждает актуальность проводимых исследований.

Один из эффективных способов организации рабочего процесса для дожигания продуктов газогенерации, содержащих большое количество конденсированной фазы, – организация процесса двухзонного горения.

Влияние на эффективность рабочего процесса в КД двухзонного дожигания продуктов газогенерации ЭКМ с высоким содержанием металлизированной конденсированной фазы путем перераспределения подачи воздуха по длине КД оценивалось ранее в некоторых расчетных отечественных [8, 12–14] и экспериментальных зарубежных исследованиях [9; 10; 15]. Однако доступных результатов актуальных экспериментальных исследований, связанных с распределенным подводом воздуха в КД, на данный момент недостаточно.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию нескольких вариантов перераспределения подвода воздуха в КД модельной установки на коэффициент полноты сгорания ЭКМ в заданных условиях работы КД в зависимости от температуры воздуха на входе и коэффициента избытка воздуха.

Цели и задачи исследований

Целью представленного этапа исследований влияния организации двухзонного дожигания продуктов газогенерации на эффективность рабочего процесса являлась оценка изменения коэффициентов полноты сгорания и гидравлических потерь при различном расстоянии между каналами подвода воздуха в модельной камере дожигания в условиях относительно невысокой температуры воздуха на входе в КД ($T_{\text{вх}} \approx 550 \dots 600$ К).

При проведении огневых испытаний с идентичными режимными параметрами стояла задача сравнительной оценки характеристик КД с перераспределением подачи воздуха и изменением расстояния между каналами подвода воздуха по оси с аналогичной конструкцией в условиях подачи полного расхода воздуха

в начальный участок модельной КД (без перепуска воздуха по длине КД).

Модельная установка с распределенным подводом воздуха в КД и условия проведения экспериментальных исследований

При исследовании влияния распределенного подвода воздуха по длине КД определяющими геометрическими параметрами КСУ являются те, что относятся к способу подачи воздуха в КД [8–10; 13–17]:

- количество каналов подвода воздуха;
- угол между каналами подвода воздуха по окружности камеры;
- угол наклона каналов подвода воздуха к оси КД (каждого индивидуально);
- расстояние между каналами подвода воздуха по оси КД ($L_{\text{пп}}$ – длина перепуска);
- относительная длина КД ($L_{\text{КД}}/D_{\text{КД}}$, где $L_{\text{КД}}$ и $D_{\text{КД}}$ – длина и диаметр КД соответственно);
- глубина передней ниши КД (расстояние от среза сопел газогенератора до первого окна подвода воздуха);
- количество сопловых отверстий газогенератора и их размещение на сопловой крышке газогенератора относительно каналов подвода воздуха;
- коэффициент перепуска воздухозаборной системы с распределенным подводом, т.е. отношение расхода воздуха в первом сечении КД (первого контура, ближнего к газогенератору) к суммарному расходу воздуха через СУ, что определяется отношением площадей первого и второго контуров подачи воздуха от ВЗУ.

При сравнительной оценке влияния перепуска воздуха на эффективность рабочего процесса в КД важное значение приобретают коэффициент избытка воздуха в первой зоне (ближней к соплам газогенератора) и суммарный коэффициент избытка воздуха в КД.

С помощью модельной установки модульной конструкции (рис. 1) были проведены сравнительные экспериментальные исследования при изменении расстояния между каналами подвода воздуха по оси КД ($L_{\text{пп}}/D_{\text{КД}} = 2,5; 5,0; 7,5$ калибров) и при отсутствии распределенного подвода ($L_{\text{пп}}/D_{\text{КД}} = 0$).

Другие геометрические параметры, являющиеся определяющими в КД с распределенной подачей воздуха, оставались неизменными или близкими по своим величинам. Относительная общая длина КД модельной установки составляла 15 калибров. Глубина передней ниши КД не менялась. Количество и пространственное расположение сопловых отверстий газогенератора одинаково для всех испытаний. Коэффициент перепуска воздуха между каналами подвода воздуха по длине КД во всех испытаниях обеспечивал близкое к стехиометрическому соотношению компонентов смеси в первой

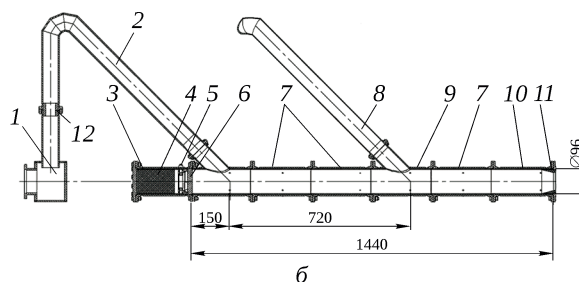
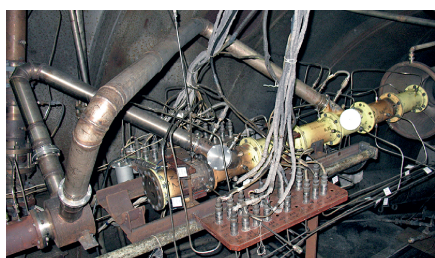


Рис. 1. Модельная стендовая установка с распределенной подачей воздуха по длине КД:

а – внешний вид; б – конструктивная схема;

1 – стендовый ресивер распределения и подачи воздуха в КД; 2 – первый канал подвода воздуха; 3 – газогенератор; 4 – заряд ЭКМ; 5 – воспламенительное устройство; 6 – сопловое днище газогенератора; 7 – проставка КД; 8 – второй канал подвода воздуха; 9 – сменные вставки теплозащитного покрытия; 10 – выходная секция КД; 11 – сопловый блок КД; 12 – дроссельная шайба

в зоне. Углы наклона каналов подвода воздуха, одинаковые для всех испытаний, составили 45° к оси установки. При отсутствии перераспределения воздух подавался через два канала, находящихся в начальной зоне КД, оси которых были расположены в одном сечении под углом 90° друг к другу. При организации перепуска один из этих каналов закрывался заглушкой, а с помощью другого канала производили подвод воздуха на той же образующей КД и на требуемом расстоянии от канала подачи воздуха, расположенного в начальной зоне камеры дожигания (см. рис. 1).

Температуру воздуха на входе в КД обеспечивали на уровне 550...600 К.

Испытательный стенд и оцениваемые характеристики рабочего процесса

Испытания проводились на стенде с присоединенным трубопроводом подачи горячего воздуха [1]. На стенде была реализована система выхода на режим по расходу и температуре воздуха через байпасный трубопровод, а также система безимпульсной подачи горячего воздуха к модельной КД. Нагрев воздуха обеспечивался с помощью электрических подогревателей омического типа.

Рабочий участок стенда оборудован системами измерения температуры, давления, силы тяги, нагрева подаваемого воздуха, автоматического сбора и обработки экспериментальных данных, улавливания и очистки продуктов сгорания и автоматизированного управления работой двигателя.

Экспериментальные исследования и обработка результатов проводились в соответствии с методикой, изложенной в работах [1; 2; 17].

Основными параметрами, характеризующими работу КД, являлись: средняя тяга за время горения ЭКМ на установившемся режиме; коэффициент избытка воздуха в КД; удельный критический (выходной) пустотный импульс маршевого сопла; коэффициент полноты сгорания; коэффициент восстановления полного давления в камере дожигания.

В соответствии с ГОСТ 23851-79 коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания определяется как отношение количества тепла, выделившегося при сгорании 1 кг топлива в камере сгорания, к его теплотворной способности.

Методика определения коэффициента полноты сгорания основана на связи экспериментальных импульсных характеристик сопла и термодинамических параметров продуктов дожигания ЭКМ [1; 2; 17], определяемых с помощью программы TERRA [18].

Результаты исследований

На модельной установке была проведена серия огне-вых испытаний с использованием модельного состава ЭКМ с массовым содержанием высокоэнергетического металлизированного компонента более 30%. Массовое содержание конденсированной фазы в продуктах газогенерации составляло не менее 60%.

Режимы работы модельной установки по давлению в газогенераторе, камере дожигания, а также по коэффициенту избытка воздуха в КД и температуре воздуха на ее входе оказывают значительное влияние на коэффициент полноты сгорания в КД [8–16].

На рис. 2 показана зависимость суммарного коэффициента полноты сгорания от относительного расстояния ($L_{\text{ин}}/D_{\text{КД}}$) по оси КД между окнами подачи воздуха (т.е. длины первой зоны). При этом модельная установка работала при относительно низком уровне давления в газогенераторе ($\sim 1,0$ МПа), повышенном суммарном коэффициенте избытка воздуха в КД ($\sim 3,0$) и относительно невысокой температуре воздуха на входе в КД (550...580 К). В первой (начальной) зоне горения КД соотношение компонентов смеси было близко к стехиометрическому.

Как показано на рис. 2, при $L_{\text{ин}}/D_{\text{КД}} = 2,5; 5,0$ и $7,5$ коэффициент полноты сгорания повышается приблизительно на 3...5, 7...10 и 18...23% соответственно, по сравнению с базовой схемой организации рабочего процесса без перепуска воздуха ($L_{\text{ин}}/D_{\text{КД}} = 0$).

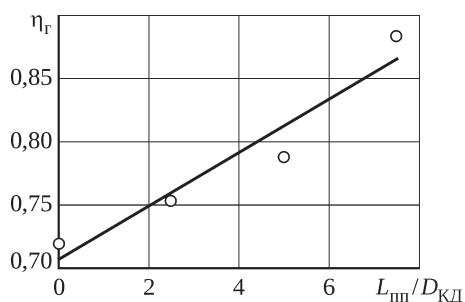


Рис. 2. Зависимость суммарного коэффициента полноты сгорания от относительного расстояния по оси КД между окнами подачи воздуха (длины первой зоны)

Как было отмечено ранее в ряде работ, например [8; 17], процесс горения частиц конденсированной фазы в условиях относительно невысокой температуры воздуха и его значительного содержания в смеси лимитируется кинетикой химических реакций, зависящей от температуры. Обеспечение коэффициента избытка воздуха близкого к стехиометрическому в первой зоне существенно повышает температуру процесса дожигания и значительно увеличивает скорость горения частиц конденсированной фазы.

Изменение расстояния между окнами подвода воздуха по длине КД оказывает существенное влияние на процесс дожигания частиц конденсированной фазы.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при максимальной исследованной длине перепуска $L_{пп}/D_{КД} = 7,5$ (максимальной длины первой зоны горения) эффект от дополнительного подвода воздуха во вторую зону наиболее значителен по сравнению с другими исследованными вариантами дополнительного подвода воздуха и базовой схемой без перепуска.

Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами расчетных исследований [8; 13; 14] и известными экспериментальными данными [9; 10; 15] и, учитывая известные особенности горения металлсодержащих компонентов конденсированной фазы [5–16], могут быть объяснены тем, что при недостаточной длине перепуска воздуха в КД (длины первой зоны) концентрация воздуха в смеси в месте подачи дополнительного воздуха (в начале второй зоны) избыточна и реализуется температура, недостаточная для продолжения эффективного процесса горения частиц конденсированной фазы.

Также установлено, что повышение давления в газогенераторе и сопутствующее повышение температуры процесса газификации оказывают существенное влияние на процесс газификации ЭКМ и дальнейший процесс дожигания в КД.

Литература

1. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки / Сорокин В.А. и др. ; под ред. Ю.М. Милехина и В.А. Сорокина. М. : Физматлит, 2010. 320 с.

Получено подтверждение имеющихся данных [16] о существенном повышении эффективности рабочего процесса в камере дожигания при увеличении давления в газогенераторе как в схеме организации рабочего процесса без перепуска воздуха в КД, так и при наличии перепуска в КД. Для варианта модельной установки с $L_{пп}/D_{КД} = 5,0$ повышение давления в газогенераторе с 2,0 до 6,5 МПа привело к увеличению коэффициента полноты сгорания на ~12% при прочих равных условиях.

Заключение

Созданная модельная установка позволила провести исследования рабочего процесса горения продуктов газогенерации металлсодержащих ЭКМ в КД при различных расстояниях между окнами подвода воздуха в камере дожигания (длине перепуска воздуха в КД) при обеспечении в начальной зоне стехиометрического соотношения компонентов смеси.

Установлено, что при работе КД в области коэффициента избытка воздуха ~3,0, при температуре воздуха на входе в КД ~550...580 К и относительно низком давлении в газогенераторе (1,0 МПа) коэффициент полноты сгорания повышается приблизительно на 3...5, 7...10 и 18...23% при относительном расстоянии по оси КД между окнами подачи воздуха 2,5; 5,0 и 7,5 соответственно, по сравнению с базовой схемой организации рабочего процесса без перепуска воздуха.

Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами расчетных исследований [8; 13; 14] и зарубежными экспериментальными данными [9; 10; 15].

При повышении давления в газогенераторе эффективность рабочего процесса в КД возрастает, в том числе для вариантов модельной установки с перепуском воздуха. Для варианта с относительным расстоянием по оси КД между окнами подачи воздуха, равным 5,0, повышение давления в газогенераторе с 2,0 до 6,5 МПа привело к увеличению коэффициента полноты сгорания на 12% при прочих равных условиях.

Представленные исследования подтверждают наличие проблем в достижении высокой полноты сгорания металлсодержащих компонентов в воздушной среде.

Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования влияния перепуска воздуха по длине КД на процесс дожигания продуктов газогенерации ЭКМ, особенно при более высоких температурах воздуха на входе в КД.

2. Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе / В.А. Сорокин, Л.С. Яновский, Д.А. Ягодников и др. ; под общ. ред. В.А. Сорокина. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 317 с.
3. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели на энергоемких конденсированных материалах / Л.С. Яновский, К.Ю. Арефьев и др. ; под общ. ред. Л.С. Яновского ; Гос. науч. центр РФ «Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П.И. Баранова». М. : ЦИАМ, 2020. 198 с.
4. Основные направления разработки твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей с повышенными энергетическими характеристиками / Вареных Н.М., Шабунин А.И., Сарабьев В.И. и др. // Боеприпасы и спецхимия. 2013. № 1. С. 44–50.
5. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.
6. Горение твердого топлива в газогенераторе воздушно-реактивного двигателя при большом содержании металла / А.В. Байков, А.Ф. Жолудев, М.Б. Кислов и др. // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92, вып. 5. С. 567–571.
7. Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнтропийном воздушном потоке / К.Ю. Арефьев, А.В. Воронцов, А.Н. Прохоров, Л.С. Яновский // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 3. С. 42–52.
8. Арефьев К.Ю., Яновский Л.С. Исследование эффективности горения борсодержащих частиц конденсированной фазы в каналах с распределенным подводом воздуха // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 1. С. 63–72.
9. Vigot C., Cochet A., Guin C. Combustion behaviour of boron-based solid propellants in a ducted rocket // Combustion of boron-based solid propellants and fuels. CRC Press, 1993. P. 386–401.
10. Vigot C., Bardelle L., Nadaud L. Improvement of boron combustion in a solid-fuel ramrocket. 1986. (22nd Joint Propulsion Conference : 16–18 June 1986, Huntsville, AL, U.S.A. ; AIAA-86-1590).
11. Оценка эффективности некоторых металлов и неметаллов в твердых топливах для ракетно-прямоточных двигателей / Л.С. Яновский, Д.Б. Лемперт и др. // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56, № 1. С. 81–94.
12. Перспективная система подвода воздуха для воздухозаборных устройств современных ракетно-прямоточных двигателей на твердом ракетном топливе / Сорокин В.А., Стирин Е.А., Федоров Д.Ю. и др. // Полет : общерос. науч.-техн. журнал. 2019. № 1. С. 41–44.
13. Рашковский С.А., Милехин Ю.М., Федорычев А.В. Повышение полноты сгорания частиц бора в ракетно-прямоточном двигателе на твердом топливе за счет распределенной подачи воздуха в камеру дожигания // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471, № 6. С. 686–691.
14. Рашковский С.А., Милехин Ю.М., Федорычев А.В. Влияние распределенного подвода воздуха в камеру дожигания ракетно-прямоточного двигателя на полноту сгорания частиц бора // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 6. С. 38–52.
15. Kubota N. Propellants and explosives : Thermochemical aspects of combustion. 2nd, completely revised and extended edition. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. XIX, 510 p.
16. Шаров М.С., Яновский Л.С., Суриков Е.В. Исследования влияния различных геометрических характеристик и режимов работы камер дожигания комбинированных двигательных установок на полноту сгорания высокоэнергетических твердых наполнителей // Авиадвигатели XXI века : всерос. науч.-техн. конф. : сб. тез. докл., Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 24–27 ноября 2015 г. М. : ЦИАМ, 2015. С. 434–436.
17. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах / В.Ю. Александров, К.Ю. Арефьев, А.Н. Прохоров и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 2 (671). С. 65–75.
18. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий // XIV Международная конференция по химической термодинамике : 1–5 июля 2002 г. : тез. докл. СПб., 2002.

References

1. Raketno-priamotchnye dvigateli na tverdykh i pastobraznykh toplivakh. Osnovy proektirovaniia i eksperimental'noi otrabotki [Rocket and ramjet engines with solid and paste fuels. Fundamentals of design and experimental development]. Sorokin V.A., Ianovskii L.S. et al.; edited by Yu.M. Milehin and V.A. Sorokin. Moscow: Fizmatlit, 2010. 320 p.
2. Proektirovanie i otrabotka raketno-priamotchnykh dvigatelei na tverdom toplive [Design and testing of solid-fuel ramjet rocket engines]. V.A. Sorokin, L.S. Ianovskii, D.A. Iagodnikov et al; edited by V.A. Sorokin. Moscow: The Bauman University Publishing House, 2016. 317 p.
3. Priamotchnye vozdušno-reaktivnye dvigateli na energoemkikh kondensirovannykh materialakh [Ramjet engines

-
- based on energy-intensive condensed materials]. L.S. Ianovskii, K.Iu. Aref'ev et al.; edited by L.S. Yanovskiy. National Research Center of the Russian Federation "Central Institute of Aviation Motors". Moscow: CIAM, 2020. 198 p.
4. Osnovnye napravleniia razrabotki tverdykh pirotekhnicheskikh topliv dlia vozdushno-reaktivnykh dvigatelei s povyshennymi energoballisticheskimi kharakteristikami [Main directions of development of solid pyrotechnic propellants for ramjets with increased energy and ballistic characteristics]. Varenykh N.M., Shabunin A.I., Sarab'ev V.I. et al. Boepripsy i spetskhiimiia [Ammunition and special chemistry]. 2013. No. 1. P. 44–50.
 5. Iagodnikov D.A. Vosplameniie i gorenii poroshkoobraznykh metallov [Ignition and combustion of metal powder]. Moscow: Bauman MSTU Publishing House, 2009. 432 p.
 6. Gorenii tverdogo topliva v gazogeneratore vozdushno-reaktivnogo dvigatel'ia pri bol'shom sodержanii metalla [Burning of solid propellant in gas generator of an air-breathing engine at large content of metal]. A.V. Baikov, A.F. Zholudev, M.B. Kislov et al. Zhurnal prikladnoi khimii [Russian Journal of Applied Chemistry]. 2019. Vol. 92, no. 5. P. 567–571.
 7. Eksperimental'noe issledovanie polnoty sgoraniia dvukhfaznykh produktov gazifikatsii borsoderzhashchikh energoemkikh kondensirovannykh sostavov v vysokoental'piinom vozdushnom potoke [Experimental study of the combustion completeness of two-phase gasification products of energetic boron-containing condensed compositions in a high-enthalpy air flow]. K.Iu. Arefyev, A.V. Voronetskii, A.N. Prokhorov, L.S. Ianovskii. Fizika gorenii i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 2017. Vol. 53, no. 3. P. 42–52.
 8. Arefyev K.Iu., Ianovskii L.S. Issledovanie effektivnosti gorenii borsoderzhashchikh chastits kondensirovannoi fazy v kanalakh s raspredelennym podvodom vozdukh [Efficiency of combustion of boron-containing particles of the condensed phase in channels with distributed injection of air]. Fizika gorenii i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 2019. Vol. 55, no. 1. P. 63–72.
 9. Vigot C., Cochet A., Guin C. Combustion behaviour of boron-based solid propellants in a ducted rocket // Combustion of boron-based solid propellants and fuels. CRC Press, 1993. P. 386–401.
 10. Vigot C., Bardelle L., Nadaud L. Improvement of boron combustion in a solid-fuel ramrocket. 1986. (22nd Joint Propulsion Conference : 16–18 June 1986, Huntsville, AL, U.S.A. ; AIAA-86-1590).
 11. Otsenka effektivnosti nekotorykh metallov i nemetallov v tverdykh toplivakh dlia raketno-priamotochnykh dvigatelei [Assessment of the efficiency of some metals and non-metals in solid propellants for ramjet engines]. L.S. Ianovskii, D.B. Lempert et al. Fizika gorenii i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 2020. Vol. 56, no. 1. P. 81–94.
 12. Perspektivnaia sistema podvoda vozdukh dlia vozdukhozabornykh ustroistv sovremennykh raketno-priamotochnykh dvigatelei na tverdom raketnom toplive [A perspective system of air supply for air intake devices of modern rocket-direct-flow engines with solid rocket fuel]. Sorokin V.A., Stirin E.A., Fedorov D.Iu. et al. Polet : obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal [All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")]. 2019. No 1. P. 41–44.
 13. Rashkovskii S.A., Milekhin Iu.M., Fedorychev A.V. Povyshenie polnoty sgoraniia chastits bora v raketno-priamotochnom dvigateli na tverdom toplive za schet raspredelennoi podachi vozdukh v kameru dozhiganiia [Improving the completeness of combustion of boron particles in a solid-fuel ducted rocket owing to distributed air supply to the secondary combustor]. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. 2016. Vol. 471, no. 6. P. 686–691.
 14. Rashkovskii S.A., Milekhin Iu.M., Fedorychev A.V. Vliianie raspredelennoho podvoda vozdukh v kameru dozhiganiia raketno-priamotochnogo dvigatel'ia na polnotu sgoraniia chastits bora [Effect of distributed injection of air into the afterburning chamber of a ram-rocket engine on the efficiency of combustion of boron particles]. Fizika gorenii i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 2017. Vol. 53, no. 6. P. 38–52.
 15. Kubota N. Propellants and explosives : Thermochemical aspects of combustion. 2nd, completely revised and extended edition. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. XIX, 510 p.
 16. Sharov M.S., Ianovskii L.S., Surikov E.V. Issledovaniia vliianiia razlichnykh geometricheskikh kharakteristik i rezhimov raboty kamer dozhiganiia kombinirovannykh dvigatel'nykh ustanovok na polnotu sgoraniia vysokoenergeticheskikh tverdykh napolnitelei [Studies of influence of various geometric characteristics and operating modes of combined propulsion systems' combustion chambers on combustion efficiency of high-energy solid fillers]. Aircraft engines of the XXI century: All-Russian scientific and technical conference: collection of abstracts. Moscow: CIAM, 2015. P. 434–436.
 17. Metodika eksperimental'nykh issledovaniia effektivnosti rabochego protsessa v vysokoskorostnykh PVRD gazogeneratortnoi skhemy na tverdykh toplivakh [The method of experimental research into the efficiency of the working process in high-speed solid fuel ramjet engines]. V.Iu. Aleksandrov et al. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2016. No. 2 (671). P. 65–75.
 18. Trusov B.G. Programmnaia sistema TERRA dlia modelirovaniia fazovykh i khimicheskikh ravnovesii [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. XIV International Conference on Chemical Thermodynamics: abstracts. July 1–5, 2002: St. Petersburg, 2002.
-

Материалы получены редакцией 02.04.2021