

ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШОМ СОДЕРЖАНИИ МЕТАЛЛА

© А. В. Байков^{1,2}, А. Ф. Жолудев², М. Б. Кислов², И. В. Пучковский²,
М. С. Шаров^{1,2}, А. В. Шиховцев², Л. С. Яновский^{1,2}

¹ Центральный научно-исследовательский институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, Москва

² Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка Московской обл.
E-mail: shav@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 28 сентября 2018 г.

После доработки 30 января 2019 г.

Принята к публикации 4 февраля 2019 г.

Исследованы особенности горения твердого топлива с высоким содержанием металла (свыше 40%) в условиях отдельно расположенного газогенератора воздушно-реактивного двигателя. Показано, что твердое топливо с высоким содержанием металла горит в режиме преимущественного тепловыделения в конденсированной фазе. Установлено, что металлическое горючее в условиях конденсированной фазы служит не простым поглотителем тепла, а играет активную роль в процессе горения. Окисление металла в условиях конденсированной фазы обеспечивает поддержание теплового баланса конденсированной фазы при горении твердого топлива.

Ключевые слова: твердое топливо; газогенератор; воздушно-реактивный двигатель; горение; металлическое горючее; окислитель; горючее-связующее; твердый остаток

DOI: 10.1134/S0044461819050037

В настоящее время в большинстве промышленно развитых стран мира ведутся активные работы по созданию ракет с прямоточными воздушно-реактивными двигателями (ПВРД) на твердом топливе. Интерес к их созданию вызван тем, что такие двигатели способны обеспечить в 2–3 раза большую дальность полета, чем традиционные ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ). В ПВРД на твердом топливе горение топлива, как правило, происходит в отдельно расположенном газогенераторе. Образовавшиеся продукты сгорания истекают из газогенератора в воздушный тракт камеры сгорания ПВРД, где они догорают после смешения с атмосферным воздухом. Горячий воздух вместе с продуктами догорания твер-

дого топлива вытекает из сопла двигателя, создавая силу тяги [1].

Чтобы повысить теплотворную способность топлива и увеличить дальность полета ракеты, в состав газогенераторного топлива вводят частицы алюминия, магния, бора. При этом массовую долю металлических частиц в заряде стремятся по возможности увеличить. Так, например, в патенте [2] предлагается топливо, содержащее 52% металлического горючего (бор), 25% окислителя (перхлората аммония) и 23% горючего-связующего (каучука).

Цель данной работы заключалась в исследовании процесса горения металлизированного топлива с тем, чтобы увеличить долю металлического горючего в за-

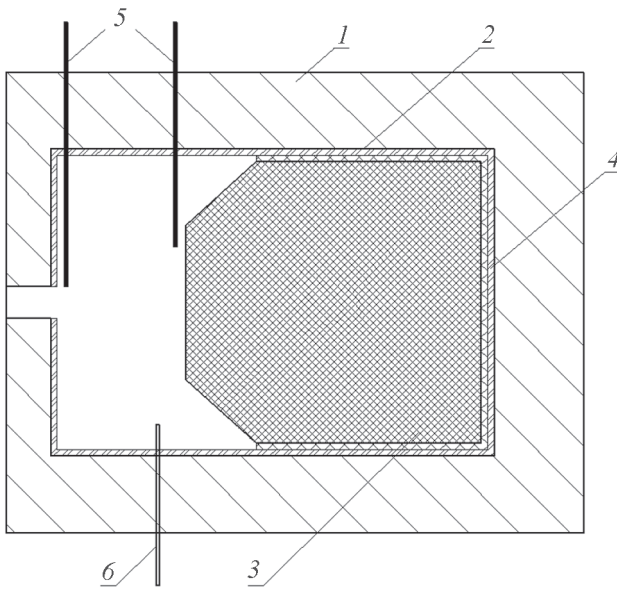


Рис. 1. Схема стендового газогенератора, предназначенного для испытания модельных образцов твердого топлива.

1 — силовой корпус, 2 — теплозащитное покрытие, 3 — заряд твердого топлива, 4 — бронировка заряда, 5 — термопары, 6 — канал измерения давления.

ряде для повышения дальности полета ракеты, на которой это топливо используется.

Экспериментальные исследования модельного газогенератора твердого топлива. На рис. 1 представлена схема твердо топливного газогенератора, который использовался для исследования характеристик горения модельных образцов твердого металлизированного топлива. Газогенератор имеет силовой корпус 1, который воспринимает давление образующихся при горении топлива газов. Для защиты от контакта с горячими газами корпус имеет теплозащитное покрытие на основе каучука 2. Заряд твердого

топлива торцевого горения 3 имеет бронирование 4, предотвращающее его горение по боковым поверхностям. В газогенераторе размещены вольфрам-рениевые термопары с открытым спаем 5. Одна термопара служит для определения температуры газов вблизи от горячей поверхности, другая — для определения температуры перед соплом. Давление измеряется по отдельному каналу 6, открывающемуся в присоединенный объем газогенератора. Для измерения давления в камере газогенератора используются тензометрические датчики давления. Воспламенение заряда производится с помощью воспламенителя, инициируемого с помощью электрозапала, провода от которого выводятся через сопло.

Типичные циклограммы давления и температуры продуктов сгорания в объеме газогенератора, полученные в экспериментах, представлены на рис. 2. В проведенных экспериментах стационарное горение топлива происходило при давлении 0.5–1.0 МПа, без проявлений неустойчивости, с линейной скоростью 3.3–3.4 мм·с⁻¹.

Анализ результатов проведенных исследований. Согласно современным представлениям о процессе горения твердого топлива, разложение перхлората аммония является основным источником тепла, обеспечивающим нагревание и разложение твердого вещества заряда в условиях конденсированной фазы (или К-фазы) [4–6]. Образовавшиеся при этом газы горят над твердой поверхностью и создают тепловой поток, который поступает в К-фазу, поддерживая в ней тепловой баланс, необходимый для горения топлива.

Но в случае топлива с составом, указанным в патенте [3], выделение тепла от разложения перхлората аммония способно обеспечить менее 50% от общего количества тепла, необходимого для нагревания и разложения твердого топлива (рис. 3).

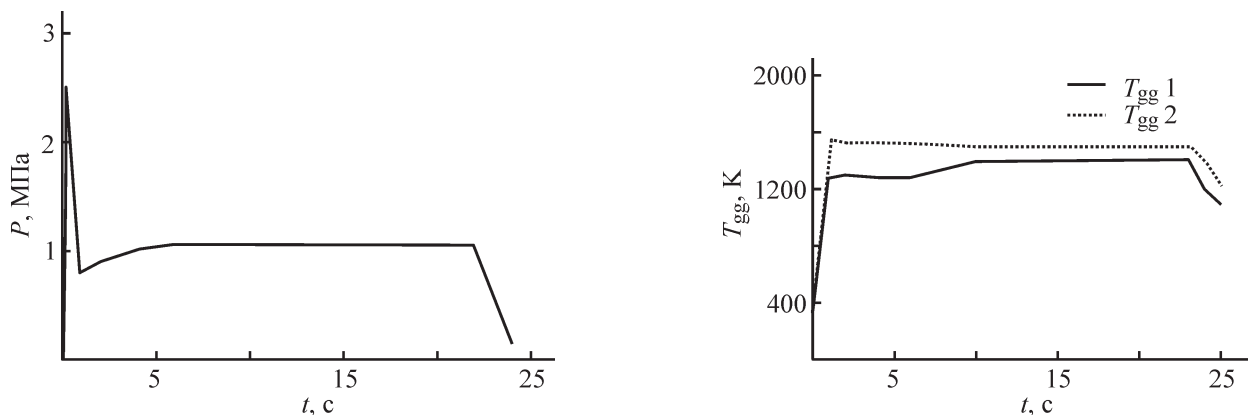


Рис. 2. Циклограммы давления и температуры газов в газогенераторе при горении образца твердого топлива.

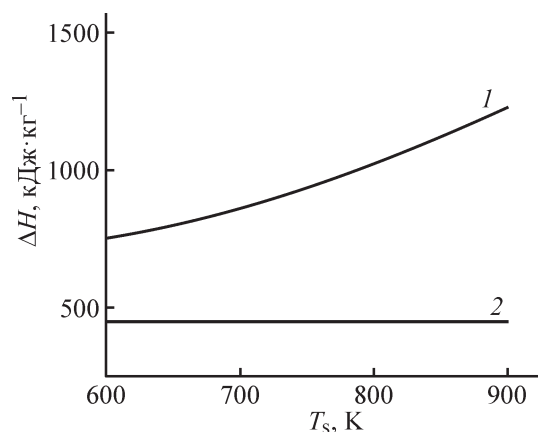


Рис. 3. Изменение энтальпии продуктов разложения К-фазы твердого топлива и количества тепла, которое может выделиться в К-фазе за счет разложения окислителя в зависимости от температуры поверхности твердого топлива для топлива, аналогичного топливу, указанному в патенте [3].

1 — энтальпия продуктов разложения твердого топлива,
2 — количество тепла при разложении перхлората аммония.

Поскольку горение твердого топлива возможно только при поддержании теплового баланса в К-фазе, можно предполагать, что недостающее тепло К-фаза получает за счет теплового потока, приходящего из газовой фазы. Но, как показывают оценки [7], тепло-

вой поток в данном случае не превышает $50 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, что примерно на два порядка меньше величины, необходимой для поддержания теплового баланса. Остается предположить, что в К-фазе существуют дополнительные источники тепла, присутствие которых не учитывается в традиционной теории.

Экспериментальные исследования отдельных аспектов процесса горения высокометаллизированного топлива. Для проверки гипотезы о дополнительных источниках тепла были проведены эксперименты по сжиганию модельных образцов твердого топлива в бомбе постоянного давления [8]. Для проведения экспериментов использовались модельные смеси, имитирующие образцы твердого топлива, которые проходили испытания в условиях стендового газогенератора.

Составы образцов, проходивших испытания в бомбе постоянного давления, представлены в табл. 1.

Образцы топлива готовили в лабораторных условиях. Использовали мелкодисперсный перхлорат аммония с максимальным диаметром частиц 50 мкм, порошок алюминия АСД-4 и мелкодисперсный порошок аморфного бора БСД-УПЗ-Э. В качестве катализатора, способствующего ускорению горения топлива, использовалось металлоорганическое соединение ДАФ [1,1-диэтилферроцен ($C_5H_4C_2H_5)_2Fe$]. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 7 мм и длиной 10–11 мм. Каждый образец помещали

Таблица 1

Составы модельных образцов твердого топлива, аналогичных по составу образцам топлива, проходившим испытания в условиях газогенератора

№ состава	Окислитель (ПХА), мас%	Горючее-связующее, мас%	Металлическое горючее, мас%	Катализатор ДАФ-2 (сверх 100% основного состава)
1	30.0	Синтетический изопреновый каучук — 30.0	Al — 40.0	3.0
2	30.0	Синтетический изопреновый каучук — 30.0	В — 40.0	3.0
2*	30.0	Синтетический изопреновый каучук — 30.0	В — 40.0	0.0
3	30.0	Синтетический диеновый каучук — 30.0	Инертный имитатор металла Al_2O_3 — 40.0	3.0
4	30.0	Синтетический диеновый каучук — 30.0	Инертный имитатор металла MgO — 40.0	3.0
5	30.0	Синтетический диеновый каучук — 30.0	Zr — 32.8 В — 8.2	3.0

* Состав не содержал катализатора ДАФ.

Таблица 2
Результаты испытаний образцов топлива в приборе высокого давления

№ испытания	№ состава	Давление, МПа	Скорость горения, мм·с ⁻¹	Масса образца, г	Твердый остаток, мас%
1	1	1.0	3.3	1.02	59.7
2	1	2.0	4.1	1.03	58.7
3	2	4.6	5.5	0.88	62.3
4	2	1.0	2.35	1.0	56.0
5	2	2.0	3.7	0.98	56.1
6	2	5.0	5.4	1.0	64.0
7	2*	2.0	2.4	1.15	64.4
8	Контрольный образец топлива	2.0	3.9	0.88	65.9
9	3	5.0	Горение отсутствует	1.20	—
10	4	5.0	Горение отсутствует	1.18	—
11	5	2.0	5.2	1.50	52.3
12	5	2.0	5.3	1.03	54.0

в стакан из текстолита, который оставлял свободной только одну торцевую поверхность, по которой происходило горение. Перед установкой в стакан негорящие поверхности образца покрывали эпоксидным клеем. Контрольный образец твердого топлива готовили путем вырезания цилиндрического образца из заряда заводского изготовления и также устанавливали в стакан из текстолита.

Все образцы сжигали в бомбе постоянного давления емкостью 3 л. Повышенное давление создавалось путем заполнения свободного объема бомбы сжатым азотом. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 2. Как показали эксперименты, при сжигании образцов топлива в бомбе постоянного давления диспергирование твердых частиц из текстолитового стакана в объем бомбы происходило не полностью. Часть твердого остатка оставалась в стакане, а часть выбрасывалась во внутренний объем. Это давало возможность собрать весь образовавшийся твердый остаток и определить его массу. Полученная масса остатка во всех случаях была больше массы металла, содержащегося в образце. Это свидетельствует о том, что только часть горючего-связующего газифицируется при горении образца, а остальное

диспергируется в твердом виде вместе с металлическими частицами.

При замене металлического горючего в образце на инертное вещество (испытания № 9, 10, табл. 2) горения образцов не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что дополнительное тепловыделение в К-фазе твердого топлива связано в основном с окислением металлических частиц. Окисление горючего-связующего тоже вносит определенный вклад (испытание № 7), но он не является ведущим, так как при отсутствии металла в заряде горение твердого топлива становится невозможным.

Замена частиц бора на алюминий не приводит к существенному изменению скорости горения. Но введение в состав топлива химически более активного тяжелого металла — циркония дает увеличение скорости горения на 40% по сравнению с алюминием (испытания № 1 и 11). Это подтверждает точку зрения, что основным источником дополнительного тепловыделения в К-фазе является окисление металлических частиц в потоке продуктов термического разложения окислителя.

Отметим, что в условиях бомбы газофазное горение над твердой поверхностью заряда происходило

в условиях пористого шлака, заполнявшего сгоревший объем. При этом изменение режима газофазного горения не оказало заметного влияния на скорость горения твердого топлива. Это также свидетельствует о том, что при горении твердого топлива определяющую роль играют тепловые процессы в К-фазе твердого топлива.

Выводы

1. Горение твердого топлива с высоким содержанием металла происходит в условиях, когда выделения тепла от разложения окислителя (перхлората аммония) недостаточно для поддержания теплового баланса К-фазы, необходимого для горения.

2. Недостающее тепло К-фаза получает за счет частичного окисления металлических частиц газобразным потоком продуктов разложения окислителя непосредственно в условиях К-фазы.

Финансирование работы

Работа выполнена на средства Института проблем химической физики РАН по теме 008920150221 «Исследования рабочих процессов при горении твердых топлив в камере сгорания высокоскоростного прямоточного воздушно-реактивного двигателя» при финансовой поддержке программой Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности» (тема «Разработка твердых топлив и горючих для газогенераторов прямоточных...»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Шиховцев Алексей Владимирович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3307-6768>

Жолудев Анатолий Федорович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6537-9846>

Кислов Михаил Борисович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7058-3369>

Пучковский Игорь Владиславович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1726-4304>

Байков Алексей Витальевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9286-6180>

Шаров Михаил Сергеевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7980-7434>

Яновский Леонид Самойлович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2603-6795>

Список литературы

- [1] Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верховомов В. К., Граменицкий М. Д., Дулепов Н. П., Скибин В. А., Суриков Е. В., Хилькевич В. Я., Яновский Л. С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / Под ред. Л. С. Яновского. М. Академкнига, 2006. 343 с.
- [2] Цуцуран В. И. Введение в технологию энергонасыщенных материалов. М.: Изд-во МО РФ, 2007. 300 с.
- [3] Pat. US (publ. 1976). Boron-Fuel-Rich Propellant Composition.
- [4] Манелис Г. Б., Назин Г. М., Рубцов Ю. И., Струнин В. А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1996. 224 с.
- [5] Шленский О. Ф. Горение и взрыв материалов. М.: Машиностроение. 2012 216 с.
- [6] Решетников С. М., Решетников И. С. Анатомия горения. М.: НГСС, Нефтегазсофтсервис, 2014. 247 с.
- [7] Baikov A. V., Olesova N. I., Razmyslov I. V., Puchkovskij I. V., Toktaliev P. D., Shikhovtsev A. V., Yanovskiy L. S. // Proc. 11th Int. High Energy Materials Conf. Exhibit (HEMCE-2017). Pune, India, 23–25 November 2017. V. 1 P. 27–36.
- [8] Бахман Н. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967. 226 с.