

НОВОЕ РАКЕТНОЕ ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ СОРБИТОЛА И ПЕРХЛОРАТА КАЛИЯ*

А. Г. Ребеко¹, Б. С. Ермолаев², В. Е. Храповский³

Аннотация: Изучены свойства ракетного топлива на основе сорбитола и перхлората калия. Стабильность и высокая скорость горения топлива, необходимые для торцевого режима горения в двигателе, достигаются добавлением катализатора, поиск которого был проведен среди простых и комплексных цианидов, цианатов и тиоцианатов. Эффективность катализатора определялась по величине линейной скорости горения в нормальных условиях. Для придания топливу пластических свойств сорбитол частично замещался на полиоксibenзолы. Для наиболее удачных композиций изучена зависимость тяговых характеристик от содержания катализатора в топливе и от начальной температуры. Проведены опыты по горению в манометрической бомбе.

Ключевые слова: смесевое твердое топливо; перхлорат калия; сорбитол; скорость горения; тяга; начальная температура

DOI: 10.30826/CE19120315

Введение

Ракетные топлива на основе перхлората калия известны давно. Имеются сведения о двух топливах, которые разрабатывались в 1943–1945 гг.: GALCIT с 20%–30% битума и Aeroflex с 20%–30% полиметилметакрилата [1]. Однако оба топлива имели высокий показатель степени по давлению в законе скорости горения (более 0,6) и горели неустойчиво при давлениях ниже 70 атм [2].

После 1945 г. интерес исследователей сконцентрировался на перхлорате аммония, который при горении в ракетных топливах не дает твердых шлаков. Исследования топлив на основе перхлората калия почти прекратились. Тем не менее сотрудниками фирмы Estes был получен патент на топливо на основе перхлората калия [3], в котором удалось снизить минимальное давление устойчивого горения до 10 атм благодаря применению «азотсодержащего горючего» и катализатора из наночастиц оксидов переходных металлов размером около 100 нм.

Принципиальный прогресс в достижении устойчивого горения в интервале давлений 1–40 атм был получен на литьевых топливах перхлората калия с сорбитолом, которые имели в своем составе катализатор, содержащий циан-группу [4]. Наиболее удачным с точки зрения дешевизны, доступ-

ности и безопасности оказался ферроцианид калия $K_4Fe(CN)_6$. Составы с этим катализатором имели приемлемую величину показателя степени в законе скорости горения (около 0,35) и горели устойчиво в области указанных давлений [4].

Сорбитол как горючее-связующее для топливных зарядов был впервые предложен сотрудником фирмы Боинг Ричардом Накка [5]. Он удобен тем, что в стехиометрической топливной смеси его массовое содержание примерно в 2 раза больше, чем в смесях на основе каучуков. Расплавы топлив на основе сорбита обладают низкой вязкостью, и их можно просто заливать в камеру сгорания ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) без использования экструдеров. Скорость горения топлив на основе сорбитола может быть достаточно большой, что позволяет конструировать РДТТ торцевого горения. Важным свойством сорбитола как связующего является его прекрасная адгезия к частицам окислителя, которой обычные каучуки, как правило, не обладают [6].

Недостаток составов на основе сорбитола в том, что он достаточно быстро кристаллизуется при хранении, теряя пластичность. Сорбитол также становится хрупким при скачкообразном повышении давления в камере сгорания ракетного двигателя.

* Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по темам 0082-2016-0011 (номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5) и 0082-2018-0004 (номер государственной регистрации АААА-А18-118031590088-8). Авторы выражают благодарность А. В. Суворову за изготовление электронного тягоизмерительного стенда и Ю. И. Лобановскому за консультации по газодинамике реактивных двигателей.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, alex@akmeon.com
²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, boris.ermolaev44@mail.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, khrapovsky@mail.ru

Перхлорат калия частично растворим в расплаве сорбитола, что неудобно, так как при охлаждении он выпадает из раствора. Этот процесс идет даже при комнатной температуре в застывшем заряде, что приводит к появлению дефектов. Поэтому особый интерес вызывают добавки, которые хорошо растворимы в сорбитоле и предотвращают его кристаллизацию, что обеспечивает сохранение пластичности литьевого заряда.

В данной статье приводятся результаты исследования, направленного на оптимизацию свойств ракетного топлива на основе сорбитола и перхлората калия. Рассмотрен каталитический эффект многочисленных соединений, содержащих циан-группы, включая цианаты, цианиды и тиоцианиды. Показано, что ферроцианид калия действительно относится к каталитическим добавкам, которые обеспечивают наиболее высокую скорость горения топлива при атмосферном давлении. Изучено действие присадок, которые способны существенно улучшить пластические свойства топлива. Для исследования взяты вещества из группы фенолов и полиоксобензолов, которые из-за наличия гидроксильных групп хорошо растворяются в расплаве сорбитола, а их кольцообразная структура предотвращает кристаллизацию расплава, нарушая ближний порядок между молекулами. Наиболее подробно изучен состав, где сорбитол частично замещался пирогаллолом. Для него проведены измерения тяговых характеристик двигателя, по их результатам определено оптимальное содержание катализатора $K_4Fe(CN)_6$ в составе. Если одновременно с пирогаллолом ввести пропиленкарбонат, то получается топливо, пригодное к длительному хранению. Для этого топлива проведены опыты по влиянию начальной температуры на тяговые характеристики двигателя, а также опыты в манометрической бомбе, которые позволяют оценить условия устойчивого горения.

Экспериментальная часть

Приготовление топлива

Смесь компонентов тонкого помола нагревалась до температуры 140 °С при постоянном перемешивании в стеклянном сосуде. Затем расплав охлаждался до комнатной температуры. Охлажденная масса вынималась из сосуда и раскатывалась в прутки, которые нарезались гранулами высотой и диаметром около 3 мм. Гранулы засыпали в трубки для измерения линейной скорости горения либо в камеру сгорания модельного ракетного двигателя и прессовали фторопластовым поршнем до образования однородной массы. Критерием од-

нородности массы служила величина пористости менее 1%.

Скорость горения

Линейная скорость горения W_0 измерялась при нормальных условиях (атмосферное давление и комнатная температура). Исследуемый состав полностью заполнял полипропиленовую трубку длиной 40 мм и внутренним диаметром 4 мм. Горение инициировали у одного из открытых торцов пламенем от газовой горелки. Начало горения сопровождалось яркой вспышкой из-за наличия щелочных металлов в топливе. Процесс горения регистрировали на цифровую видеокамеру и определяли время горения. Зная длину образца и время горения, вычисляли среднюю величину линейной скорости горения.

В первой серии опытов изучали каталитическое действие циан-содержащих добавок на скорость горения стехиометрического состава (массовые доли компонентов 71,4% перхлората калия и 28,6% сорбитола). Циан-содержащая добавка вводилась в стехиометрическую смесь в количестве 10% сверх 100%. Таким образом, содержание перхлората калия, сорбитола и катализатора в топливе равнялось 64,9%, 26,0% и 9,1% соответственно.

Всего было изучено 17 веществ. Примеры результатов измерений приведены в табл. 1. Скорость горения стехиометрического состава равна 1 мм/с. К числу катализаторов, которые обеспечивают значительное повышение скорости горения до 4,5 мм/с и выше, относятся ферроцианиды калия, $K_2Ni(CN)_4$, KSCN, KOCN и KCN. В целом

Таблица 1 Влияние циан-содержащего катализатора на среднюю скорость горения стехиометрической топливной смеси 71,4% перхлората калия и 28,6% сорбитола. Катализатор введен в смесь в количестве 10% сверх 100%. Скорость горения измерена при нормальных условиях (давление 0,1 МПа, температура 25 °С)

Катализатор	Средняя скорость горения, мм/с
Отсутствует	1
$Fe(CN)_2$	3,2
$K_3Cr(CN)_6$	2,1
$Cu_2Fe(CN)_6$	3,9
$K_3Co(CN)_6$	4,4
$K_2Ni(CN)_4$	5
$K_4Fe(CN)_6$	5,1
KSCN	4,8
KOCN	4,6
KCN	5,5

можно сделать вывод, что комплексные соли металлоцианидов проявляют гораздо большую активность, чем простые цианиды переходных металлов; $\text{Zn}(\text{CN})_2$, $\text{Mn}(\text{CN})_2$, $\text{Cr}(\text{CN})_3$, $\text{Ni}(\text{CN})_2$, $\text{Co}(\text{CN})_2$, CuCN и тиоцианид CuSCN придают топливу скорость горения менее 3 мм/с. Наибольшую скорость горения 5,5 мм/с обеспечивает KCN . По-видимому, основной вклад в ускорение горения вносит группа CN , даже без участия металлов переходной группы. $\text{K}_2\text{Ni}(\text{CN})_4$ дорог и, кроме того, подвергается гидролизу при нагревании в присутствии влаги. Неплохой альтернативой $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ могут служить KOCN и KSCN . Полной неожиданностью оказалась инертность соединения $\text{KAg}(\text{CN})_2$, которое не проявляет себя ни как катализатор, ни как ингибитор горения.

В следующей серии опытов был изучен эффект, который оказывает замена части перхлората калия на другие окислители в присутствии катализатора $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Оказалось, что добавки перхлората и нитрата аммония в количестве около 6% заметно ингибируют горение, снижая скорость горения до 1,7 и 0,9 мм/с соответственно. Напротив, добавка KNO_3 , NaNO_2 и KJ в том же количестве приводит к росту скорости горения до 5,7, 6,6 и 6,6 мм/с соответственно.

В третьей серии опытов измерения скорости горения проводили в ходе оптимизации пластических свойств топлива. Особый интерес вызывают добавки, которые предотвращают кристаллизацию сорбитола, но не снижают скорость горения топлива. Чтобы получить пластичное топливо, часть сорбитола можно заменить глюкозой или фрукто-

зой. Однако если нагреть такое топливо и перевести в расплав, то в нем начинаются реакции «кара멜лизации», связанные с термическим разложением углеводов, и выделяется углекислый газ.

Если добавить порошки полимерной природы (поливиниловый спирт, крахмал, карбоксиметилцеллюлозу), топливо остается хрупким, и лишь добавкой севилена получается пластичное топливо. Однако во всех этих случаях скорость горения оказалась низкой. Добавки салициловой кислоты, дигидроксиацетона, бензойной кислоты, бензоата натрия и сорбиновой кислоты, содержащей сопряженные двойные связи, также приводят к снижению скорости горения. Добавка глюконата натрия, аскорбиновой кислоты или инозита оставляют скорость горения на приемлемом уровне, однако топливо получается хрупким. Кроме того, в случае аскорбиновой кислоты при нагревании происходит разложение с выделением углекислого газа. Добавки жидких горючих: полиэтиленполиамин, глицерина, этиленгликоля, полиэтиленгликоля-4000 — дают пластичные топлива, однако у этих топлив низкая скорость горения (менее 2 мм/с), и спустя две недели хранения при комнатной температуре они затвердевают. При добавке пластификатора пропиленкарбоната топливо демонстрирует высокую скорость горения и сохраняет пластичность в течение 3 мес. Добавки пентаэритрита, 2,6-диметил-гамма-пирона, дегидроацетовой кислоты, параформа и дигидроксиацетона не дали приемлемых результатов.

Использование фенолов и хинонов обычно приводит к повышению скорости горения и придает

Таблица 2 Влияние замещения четвертой части сорбитола органическими добавками на среднюю скорость горения базового топлива 71,4% перхлората калия и 28,6% сорбитола с катализатором $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ в процентах сверх 100% при нормальных условиях

№	Добавка	Катализатор, % сверх 100%	Скорость горения, мм/с
1	Отсутствует	0	1
2	Отсутствует	10	4,7
3	Флороглюцин	0	2,6
4	Флороглюцин	2	3,9
5	Флороглюцин	5	5,4
6	Флороглюцин	10	6,9
7	Пирогаллол	0	1,1
8	Пирогаллол	1	1,9
9	Пирогаллол	2	3,3
10	Пирогаллол	5	5,0
11	Пирогаллол	10	6,8
12	Резорцин	10	6,1
13	Пропиленкарбонат	10	4,2
14	Пирогаллол/Пропиленкарбонат	5	5,5

топливу пластичность. Однако на примере хинона, родизоната натрия, гексаоксоциклогексана и тетрагидрокси-1,4-хинона было показано, что наряду с высокой скоростью горения топлива приобретают пористость. Это, видимо, связано с тем, что хиноны при нагреве вступают в окислительно-восстановительные реакции, образуя гидрохиноны. Похожее поведение обнаруживает $K_3Fe(CN)_6$. При нагревании с ним расплав топлива синее и в нем появляются пузыри. По этим причинам от дальнейшего изучения хинонов пришлось отказаться.

Наилучшие результаты получены при использовании в качестве добавок флороглуцина, пирогаллола и резорцина. Соответствующие данные по скорости горения для композиций с этими добавками на основе перхлората калия, сорбитола и катализатора горения $K_4Fe(CN)_6$ приведены в табл. 2. Высокие значения скорости горения позволяют снизить почти вдвое содержание катализатора в смеси. Пластичность топлив сохраняется в течение месяца. При одновременном вводе добавок пирогаллола и пропиленкарбоната топливо оказывается негигроскопичным и сохраняет пластичность не менее года.

Тяговые характеристики

Выбранные образцы топлива испытывались в реактивных двигателях торцевого горения, сделанных из прочной бумажно-бакелитовой трубки. Внутренний диаметр трубки составил 12 мм, внешний диаметр — 16 мм, длина трубки — 60 мм. В трубку вклеивался сопловой блок в форме цилиндра из корундовой керамики длиной 7 мм, в котором имелось сквозное отверстие диаметром 2 мм. Как показали проведенные испытания, такой двигатель способен выдержать давление до 15 МПа при работе в течение 4–5 с.

Заряд топлива готовился следующим образом. В сквозное отверстие сопла вставлялся полипропиленовый стержень, затем в двигатель засыпались гранулы топлива массой $\sim 7,4$ г и запрессовывались фторопластовым поршнем. Двигатель с топливом нагревался в стеклянной пробирке до температуры 120 °С, выдерживался в течение 5 мин и охлаждался до комнатной температуры. Участок канала, оставшийся свободным, заливался эпоксидной смолой, которая при затвердевании формовала заглушку двигателя. Затем из сопла извлекался полипропиленовый стержень и проводился опыт. Поджиг заряда осуществлялся спиралью накаливания, которая вводилась в камеру сгорания через сопло. Тяга двигателя измерялась тягоизмерителем — специальным электронным устройством, в котором для получения данных использован измерительный

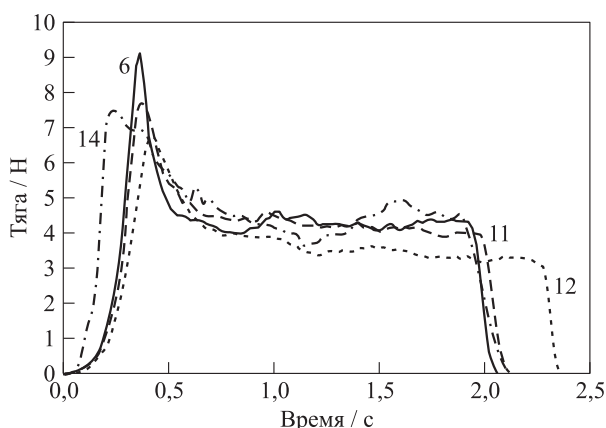


Рис. 1 Диаграмма тяги двигателя для составов: с 10% катализатора $K_4Fe(CN)_6$ с различными добавками (флороглуцин (6), пирогаллол (11), резорцин (12)) и с 5% катализатора $K_4Fe(CN)_6$ для добавки пирогаллол/пропиленкарбонат (14). Номера соответствуют составам из табл. 2

мост Уитстона. Измеренная диаграмма дает зависимость тяги от времени $F(t)$. На рис. 1 приведены характерные диаграммы для разных составов из табл. 2. Кривые имеют стартовый всплеск в начале работы двигателя. Затем сигнал, спустя некоторое время, выходит на плато. Тяговые диаграммы для топлив с добавками флороглуцина и пирогаллола почти идентичны. Диаграмма для топлива с добавкой резорцина имеет несколько меньшую амплитуду на плато и большую длительность, что объясняется меньшей величиной скорости горения.

Интегрируя функцию $F(t)$ в пределах полного времени работы двигателя (от 0 до T), получаем средний импульс тяги J , создаваемый двигателем. По величине J можно оценить среднюю скорость истечения реактивной струи $V_e = J/M$ и среднюю тягу $F_m = J/T$, где M — масса сгоревшего топлива. Зная длину топливной шашки L и время T , можно оценить среднюю линейную скорость горения топлива в камере сгорания $W_p = L/T$.

Наконец, зная тягу, можно оценить давление в камере сгорания P . Предполагая стационарное истечение продуктов горения с показателем политропы k из сопла — очко с проходным сечением S , имеем [7, 8]:

$$F = S [(k+1)P_{cr} - P_0],$$

где P_0 — внешнее давление, предположительно равное атмосферному; P_{cr} — давление в сечении сопла, связанное с давлением в камере формулой:

$$P_{cr} = P \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}.$$

Таблица 3 Влияние содержания катализатора $K_4Fe(CN)_6$ на характеристики топлива с замещением четвертой части сорбитола на пирогаллол

№	Содержание катализатора, % сверх 100%	W_0 , мм/с	W_p , мм/с	P , МПа	V_e , м/с	F_m , Н
8	1	1,9	12,8	0,98	1172	3,2
9	2	3,3	14,9	1,16	1226	3,9
10	5	5,0	16,8	1,26	1225	4,2
11	10	6,8	18,4	1,32	1199	4,5
14	5	5,5	17,3	1,56	1227	4,4

Примечания.

1. Нумерация составов соответствует табл. 2.
2. Состав 14 отличается от состава 10 тем, что содержит комбинированную добавку пирогаллол/пропиленкарбонат в соотношении 2,5/1.

Учитывая, что для рассматриваемых композиций продукты горения содержат значительную долю конденсированной фазы и, следовательно, показатель k имеет значения на уровне 1,1–1,15, получим приближенно:

$$F = S(1,23P - P_0).$$

Состав с пирогаллолом показал наилучшие характеристики. Были проведены опыты для аналогичных составов, но с разным содержанием катализатора ферроцианида калия. Характеристики топлив приведены в табл. 3. Видно, что хотя при уменьшении содержания катализатора от 10% до 5%, 2% и 1% средняя скорость горения, тяга и давление в камере монотонно снижаются, наибольшая величина V_e получена на образцах с 5% и 2% катализатора.

Интерес представляет топливо, в котором использована комбинированная добавка из пирогаллола с пропиленкарбонатом (в соотношении 2,5/1). Эта добавка обеспечивает сохранность пластических свойств топлива без заметных признаков отвердевания в течение более года. Как видно из рис. 1 и табл. 3, это топливо (состав 14) демонстрирует хорошие тяговые характеристики, которые при содержании катализатора 5% почти не отличаются от характеристик топлива 10 с добавкой чистого пирогаллола.

Поведение топлива с комбинированной добавкой было изучено при повышенных температурах. Схема устройства с термостатом, позволяющим изменять начальную температуру топливного заряда, приведена на рис. 2. Ракетный двигатель помещался в медный термостат с водой, который устанавливался на измерительный стенд и нагревался до заданной температуры газовой горелкой. Температура измерялась двумя термопарами, которые устанавливались в сопле на торце заряда и на поверхности двигателя между внешней стенкой двигателя

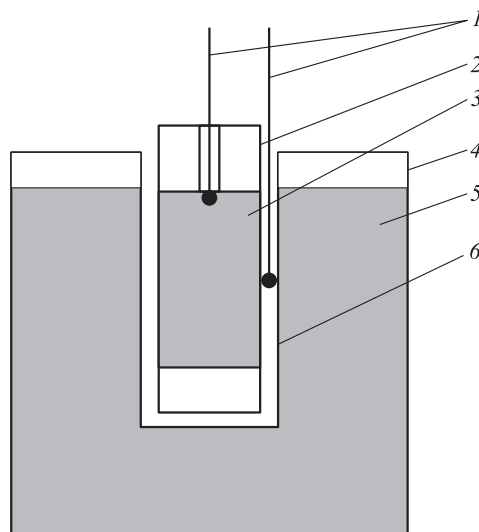


Рис. 2 Схема ракетного двигателя с термостатом для получения диаграмм тяги при различных начальных температурах заряда: 1 — термопары; 2 — ракетный двигатель; 3 — заряд топлива; 4 — бак термостата; 5 — вода; 6 — медный стакан — держатель для двигателя

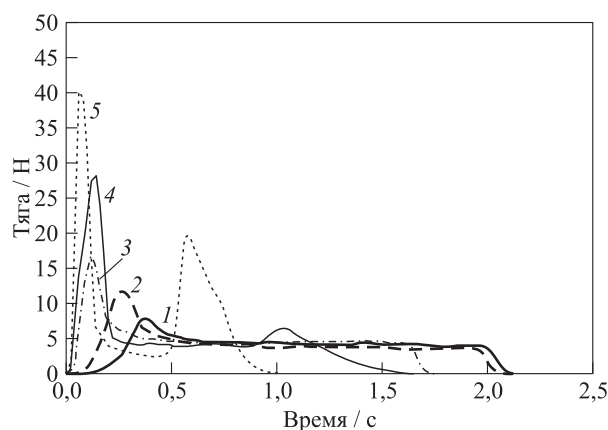


Рис. 3 Влияние начальной температуры на диаграмму тяги для топлива 14 (см. табл. 2 и 3): 1 — 20 °C; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 45; 5 — 50 °C

и внутренней стенкой термостата. Среднеарифметическое значение показаний термопар принималось в качестве температуры топливного заряда. Разница показаний между термопарами обычно не превышала 1 °C.

Опытные диаграммы тяги приведены на рис. 3. Видно, что вплоть до 40 °C заряд данного состава работает нормально. Сохраняется обычная форма диаграммы со стартовым всплеском тяги и последующим платообразным участком. По мере увеличения начальной температуры растет амплитуда тяги и сокращается время горения. При температуре 45 °C появляются изменения: резко возрастает

стартовый всплеск тяги, увеличивается скорость горения и сокращается длина участка плато, в конце участка появляется заметный горб, значительно увеличивается участок спада в конце работы двигателя. При температуре 50 °С эти изменения усиливаются, и при начальной температуре 60 °С двигатель взрывается. Эти результаты, очевидно, вызваны размягчением топлива при температуре 45 °С и выше.

Опыты в манометрической бомбе

Для проверки устойчивости горения топлива с комбинированной добавкой проведены опыты в манометрической бомбе. Использовалась бомба номинальным объемом 80 см³. Исследуемый образец цилиндрической формы диаметром 15 мм, высотой 15,25 мм, массой 5,35 г и пористостью 0,7% размещался на дне бомбы. Боковая поверхность образца не покрывалась бронировкой. Диаграмма давления в бомбе измерялась пьезокварцевым датчиком Т-6000 марки Kistler; сигнал датчика поступал на цифровой анализатор. Погрешность регистрации давления не превышала 8%. Воспламенитель, составленный из дымного пороха массой 0,71 г, создавал в бомбе начальное давление около 2 МПа. Пример диаграммы давления для топлива с комбинированной добавкой приведен на рис. 4. Диаграмма имеет стандартную форму, горение исследуемого топлива начинается с небольшой задержкой после срабатывания воспламенителя и завершается в момент времени около 150 мс при давлении 23,6 МПа. Отсутствуют какие-либо изломы, указывающие на срыв послойного горения. Средняя скорость горения (оценка получена как отношение радиуса таблетки ко времени до максимума давления) составляет около 50 мм/с.

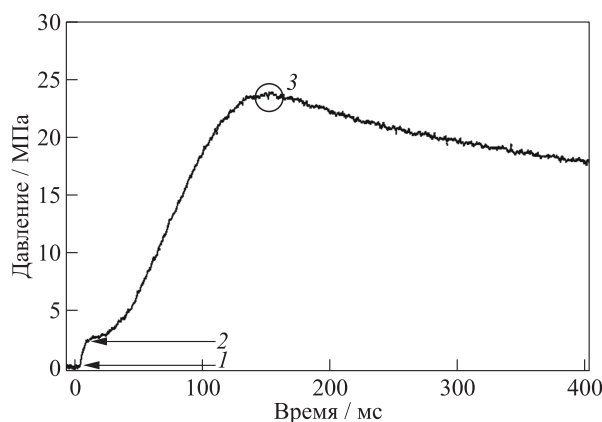


Рис. 4 Диаграмма давления в манометрической бомбе для состава 14 (см. табл. 2): 1 — начало горения воспламенителя; 2 — конец горения воспламенителя; 3 — завершение горения образца (время 153 мс, давление 23,6 МПа)

Заключение

Изучены свойства ракетного топлива на основе сорбитола и перхлората калия. Стабильность горения в области низких давлений достигается добавлением катализатора ферроцианида калия, поиск которого был проведен среди простых и комплексных цианидов, цианатов и тиоцианатов. Эффективность катализатора определялась по величине линейной скорости горения в нормальных условиях. Показано, что ферроцианид калия действительно относится к каталитическим добавкам, которые обеспечивают наиболее высокую скорость горения топлива при атмосферном давлении.

Изучено действие присадок, которые позволяют существенно улучшить пластические свойства топлива. Для двух составов топлива, в которых четвертая часть сорбитола была заменена пирогаллолом или комплексной присадкой из пирогаллола и пропиленкарбоната, обеспечившей пластичность топлива при длительном хранении, проведены испытания с измерением тяги в модельном ракетном двигателе. Цилиндрические заряды топлива сжигались в режиме торцевого горения.

Опыты, проведенные при комнатной температуре, показали нормальную работу двигателя с высокими, хорошо воспроизводимыми тяговыми характеристиками. Типичная диаграмма тяги имеет основной платообразный участок, который устанавливается после короткого стартового всплеска. Длительность горения ~ 2–3 с при оценочном давлении в камере 1–1,5 МПа. В опытах варьировали содержание катализатора и начальную температуру топлива.

Оптимальные результаты получены при 5%-ном содержании ферроцианида калия. При повышении начальной температуры заряда стабильные результаты получены лишь до 40 °С. При более высоких температурах платообразный участок на диаграмме тяги сокращается, возникают горбы в начале и конце диаграммы, а также затянутый конечный участок диаграммы; при 60 °С получен взрыв двигателя.

Опыты в манометрической бомбе, проведенные на топливе с комплексной присадкой при комнатной температуре, показали стабильное горение с максимумом давления выше 23 МПа и отсутствием изломов, отражающих срыв послойного горения.

Литература

1. *Launius R. D.* To reach the high frontier: A history of U.S. launch vehicles. — Lexington, KY, USA: University Press of Kentucky, 2003. 233 p.

2. Пономаренко В. К. Ракетные топлива. — СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1995. 372 с.
3. Dixon S., Tunick B., Brown E. Composite propellant compositions. U.S. Patent 20040094250 A1, 2004.
4. Ребеко А. Г. Новые ракетные топлива на основе перхлоратов металлов. Патент РФ № 2594218, 2014.
5. Афанасьев И. Б., Суворов А. В. В космос на сахаре: «Карамельное топливо» // Популярная механика, 2008. № 4. С. 80.
6. Sutton G. P., Biblarz O. Rocket propulsion elements. — 8th ed. — Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2010. P. 595–599.
7. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1970. Т. 2. 48 с.
8. Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полета. — М.: Наука, 1979. 21 с.
9. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973. 293 с.

Поступила в редакцию 12.08.19

NOVEL ROCKET PROPELLANT BASED ON SORBITOL AND POTASSIUM PERCHLORATE

A. G. Rebeko, B. S. Ermolaev, and V. E. Khrapovskii

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The properties of a novel rocket propellant based on sorbitol and potassium perchlorate have been studied. The stability and high burning rate required for the faced combustion regime of the propellant in the combustion chamber are achieved by adding a catalyst, the search of which was conducted among simple and complex cyanides, cyanates, and thiocyanates. The efficiency of the catalyst was determined by the magnitude of the linear burning rate under normal conditions. To give the propellant plastic properties, sorbitol was partially replaced with polyoxybenzenes. For the most successful compositions, the dependences of the thrust characteristics on the catalyst content in the propellant and on the initial temperature have been studied. The experiments on propellant burning in a manometric bomb have also been performed.

Keywords: composite solid propellant; potassium perchlorate; sorbitole; burning rate; thrust; initial temperature

DOI: 10.30826/CE19120315

Acknowledgments

This work was partly supported by the subsidy given to the N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the state assignment on the topic No.0082-2016-0011 “Fundamental studies of conversion processes of energetic materials and development of scientific grounds of controlling these processes” (State Registration No. AAAA-A17-117040610346-5) and topic 0082-2018-004 (State Registration No. AAAA-A18-11803159008808). The authors thank A. V. Suvorov for the production of the electronic thrust-measuring test rig and Yu. A. Lobanovskii for consulting on the issues dealing with the gasdynamics of jet engines.

References

1. Launius, R. D. 2003. *To reach the high frontier: A history of U.S. launch vehicles*. Lexington, KY: University Press of Kentucky. 233 p.
2. Ponomarenko, V. K. 1995. *Raketnye topliva* [Rocket propellants]. St. Petersburg: VIKKA im. A. F. Mozhayskogo. 372 p.
3. Dixon, S., B. Tunick, and E. Brown. 2004. Composite propellant compositions. U.S. Patent 20040094250 A1.
4. Rebeko, A. G. 2014. *Novye raketnye topliva na osnove perkhloratov metallov* [New rocket propellants based on metal perchlorates]. Patent RF No. 2594218.
5. Afanasiev, I. B., and A. V. Suvorov. 2008. *V kosmos na sachare: “Karamel’noe toplivo”* [Into the space using sugar: “Caramel propellant”]. *Populyarnaya mekhanika* [Popular Mechanics] 4:80.
6. Sutton, G. P., and O. Biblarz. 2010. *Rocket propulsion elements*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 595–599.
7. Sedov, L. I. 1970. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Mechanics of continuum]. Moscow: Nauka. Vol. 2. 48 p.
8. Feodosiev, V. I. 1979. *Osnovy tekhniki raketnogo poleta* [Fundamentals of rocket flight engeneering]. Moscow: Nauka. 21 p.
9. Belyaev, A. F., V. K. Bobolev, A. I. Korotkov, A. A. Sulimov, and S. V. Chuiko. 1973. *Perekhod gorennya kondensirovannykh sistem vo vzryv* [Transition of burning in condensed systems into explosion]. Moscow: Nauka. 293 p.

Received August 12, 2019

Contributors

Rebeko Alexey G. (b. 1966) — research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; alex@akmeon.com

Ermolaev Boris S. (b. 1940) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; boris.ermolaev44@mail.ru

Khrapovskii Vladimir E. (b. 1945) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; khrapovsky@mail.ru