

ГАЗИФИКАЦИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ*

В. И. Звегинцев¹, А. В. Федорычев², Д. В. Жестерев³, И. Р. Мишкин⁴, С. М. Фролов⁵

Аннотация: Выполнены эксперименты и определены количественные характеристики процесса газификации легкоплавких углеводородных материалов (полиэтилена и полипропилена (ПП)) в потоках высокотемпературного инертного газа. Показано, что выход продуктов газификации увеличивается с увеличением температуры несущего газа и полноты отвода тепла в материал. Минимальное отношение между расходами несущего газа и продуктов газификации в экспериментах составило 4,5.

Ключевые слова: легкоплавкое горючее; инертный газ; газогенератор; высокотемпературный поток несущего газа; продукты газификации

DOI: 10.30826/CE19120312

Введение

В настоящее время отмечается растущий интерес к созданию энергосиловых установок с ракетно-прямоточными двигателями (РПД). Один из основных элементов РПД — газогенератор с зарядом твердого топлива. Исходя из специфики работы РПД, топливо газогенератора должно содержать минимальное количество окислителя [1–5], достаточное для горения и газификации топлива перед подачей газообразных продуктов в основную камеру сгорания. Наличие дополнительного окислителя на борту является недостатком такой схемы энергосиловой установки и ухудшает ее тягово-экономические характеристики.

В современной научной литературе активно обсуждается возможность создания низкотемпературных газогенераторов для РПД с температурой продуктов сгорания на выходе из газогенератора ~ 1000 К и ниже [6–12]. В этих работах рассматривается конструкция газогенератора с последовательным расположением заряда из обычного безметалльного твердого топлива и блока газифицируемого легкоплавкого (с температурой плавления до 100 °С) горючего (ЛПГ). При сгорании твердого топлива образуется поток высокотемпературных продуктов сгорания, который проходит через блок ЛПГ и осуществляет его газификацию. Общий рас-

ход газа на выходе увеличивается за счет притока газообразных продуктов газификации. Образовавшаяся смесь продуктов сгорания топлива и продуктов газификации ЛПГ обладает высоким энергетическим потенциалом, имеет низкую температуру и не содержит в своем составе конденсированной фазы. Низкотемпературная смесь продуктов сгорания топлива и продуктов газификации дополнительно обеспечивает возможность охлаждения силовых элементов конструкции летательного аппарата (ЛА). В качестве ЛПГ рассматриваются полимеры (полиэтилен, ПП, полистирол, полибутадие и др.), высокоплотные углеводороды (ДАМСТ, бинор-5, антрацен), каучуки и резины, а также их комбинации с различными наполнителями [1, 2, 13].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование количественных характеристик газификации углеводородных ЛПГ в потоке высокотемпературного инертного газа на лабораторной и крупномасштабной установках.

Лабораторная установка

Лабораторная установка с модельным газогенератором (МГГ) для исследования характеристик газификации углеводородных материалов в потоке высокотемпературного газа представлена на рис. 1.

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (проект АААА-А17-117030610121-9). Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ 18-08-00076а).

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, zvegin@itam.nsc.ru

² ФГУП «ФЦДТ «Союз», dgr56@mail.ru

³ ФГУП «ФЦДТ «Союз», d_zhesterev@mail.ru

⁴ ФГУП «ФЦДТ «Союз», mir1988@mail.ru

⁵ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

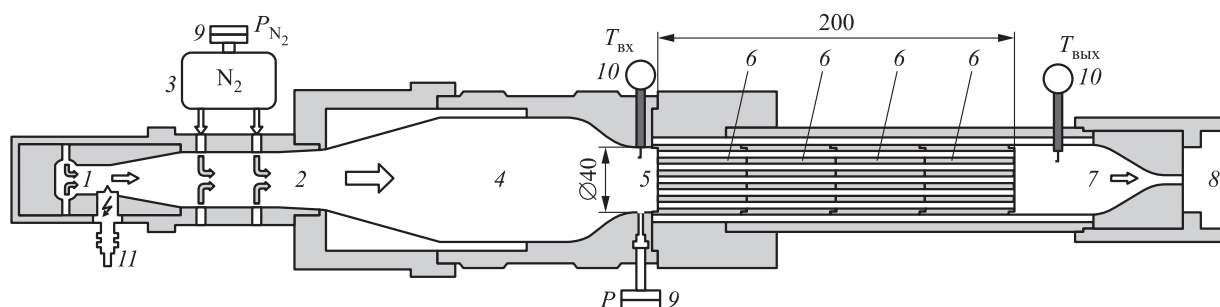


Рис. 1 Конструктивная схема МГГ: 1 — камера сгорания огневого нагревателя; 2 — камера смешения; 3 — баллон азота; 4 — выравнивающая форкамера; 5 — сопло; 6 — блок углеводородного материала; 7 — выход газогенератора; 8 — дроссель; 9 — датчики давления; 10 — термопары; 11 — свеча зажигания. Размеры указаны в миллиметрах

На входе газогенератора размещена камера сгорания 1 огневого подогревателя, в которой происходит воспламенение и горение стехиометрической смеси водорода с кислородом. Сюда же подается рабочий газ — нейтральный азот, который нагревается до требуемой температуры в камере смешения 2 и подается через форкамеру 4 и профилированное сопло 5 к испытываемому блоку углеводородного материала 6.

В качестве испытываемого углеводородного материала рассматривается ПП марки РР Н030 GP/1 по ТУ 2211-103-70353562-2013. Результаты хроматографического анализа в [14] показали, что газообразные продукты газификации ПП состоят из пропилена C_3H_6 , изобутена C_4H_8 , этана C_2H_6 , метана CH_4 , этилена C_2H_4 и пропана C_3H_8 .

Испытываемый углеводородный блок (УБ) собирается из четырех цилиндрических вставок диаметром 40 мм и длиной по 50 мм (рис. 2). В каждой вставке имеется 19 равномерно расположенных продольных каналов диаметром 3 мм. Общая площадь проходного сечения каналов составляет $134,3 \text{ мм}^2$.

После УБ газовый поток вытекает в небольшой цилиндрический канал 7, который заканчивается дросселирующей вставкой 8 с диаметром проходного сечения 6,5 мм (площадь $33,2 \text{ мм}^2$). Применение дросселирующей вставки позволяет поддерживать дозвуковую скорость потока в канале газогенератора.

Испытания МГГ проводятся следующим образом. По командам системы синхронизации запускается регистрация показаний измерительных датчиков и одновременно включаются клапаны подачи водородно-кислородной смеси. Через 200 мс включается свеча зажигания и начинается горение водородно-кислородной смеси в огневом подогревателе. После 300 мс работы свеча зажигания выключается, но горение водородно-кислородной смеси продолжается. В камеру смешения подается азот, который за счет смешения нагревается здесь до заданной температуры. Для регулирования температуры нагрева несущего газа расход водорода в разных опытах изменяется в пределах от 0,3 до 2,4 г/с. Между расходами водорода и кислорода в огневом подогревателе выдерживается стехио-

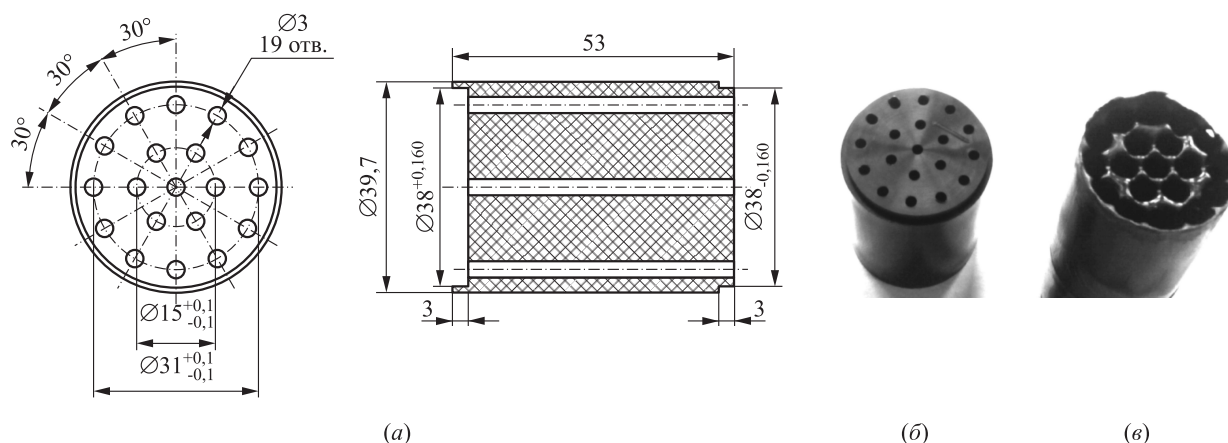


Рис. 2 Схема УБ (а) и общий вид испытываемых образцов до (б) и после (в) горения. Размеры указаны в миллиметрах

метрическое соотношение ($\alpha = 1,0$; $L_0 = 8$) и, как показывают измерения, обеспечивается их полное сгорание.

Нагретый несущий газ (азот и продукты сгорания водорода с воздухом) проходит через каналы в исследуемом образце, где происходит нагрев и газификация материала стенок. На выходе газогенератора формируется смесь несущего газа и продук-

тов газификации ЛПГ. Через 2300 мс подача всех газов на входе отключается, и эксперимент прекращается. Запись параметров прекращается при $t = 3000$ мс.

Во время эксперимента регистрируются:

- давление в баллонах подачи водорода и кислорода;
- давление в баллоне азота;

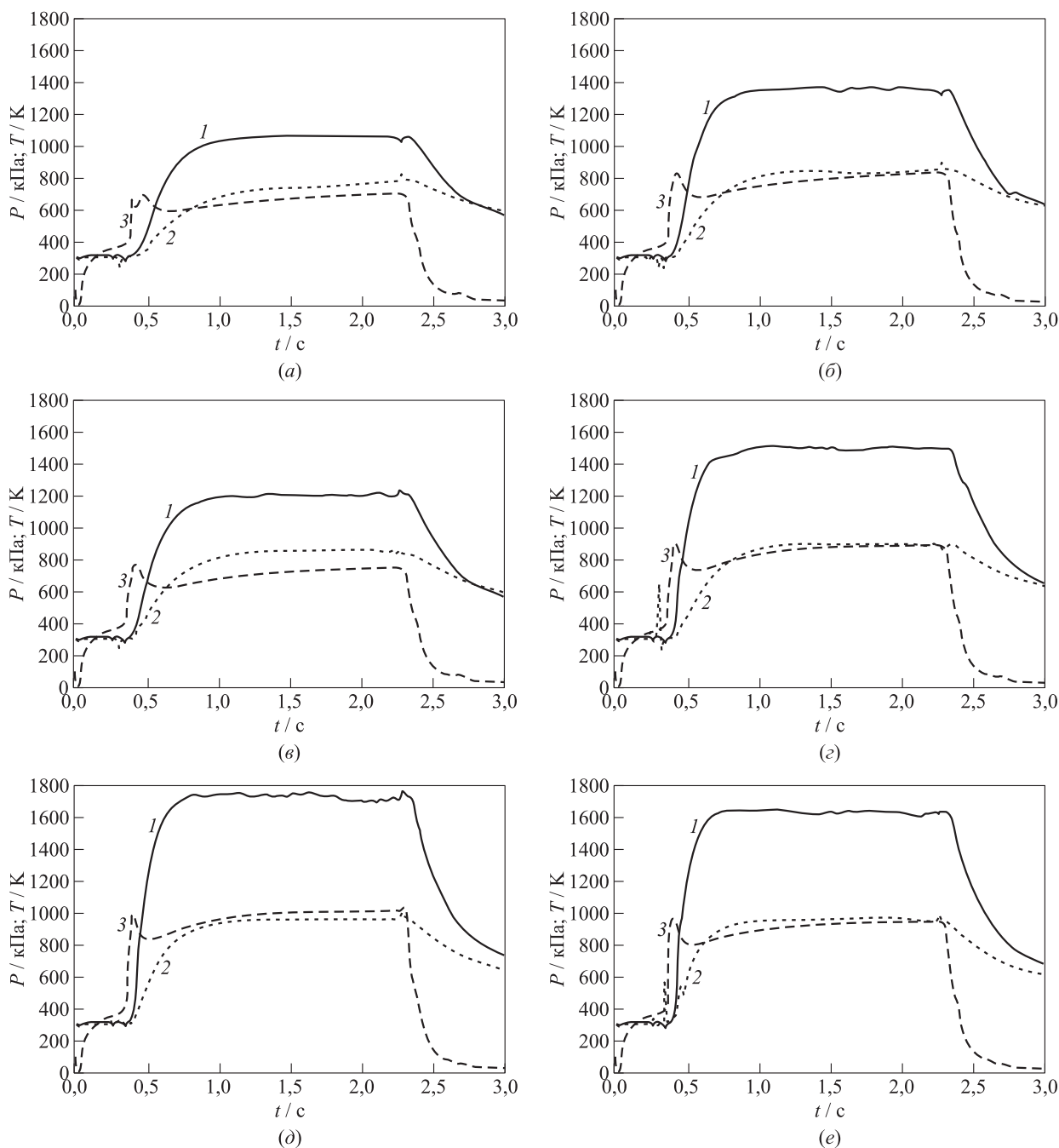


Рис. 3 Типичные записи температуры (1 — $T_{вх}$; 2 — $T_{вых}$) и давления (3) в экспериментах с газификацией УБ: (а) № 8; (б) № 10; (в) № 12; (г) № 16; (д) № 18; (е) № 20

Таблица 1 Осредненные по времени результаты испытаний малогабаритного газогенератора

№№ опыта	Время режима $t_{\text{гор}}$, с	Средняя температура $T_{\text{вх}}$, К	Средняя температура $T_{\text{вых}}$, К	Среднее давление P , кПа	Расход газа на входе $G_{\text{вх}}$, г/с	Средний выход продуктов $G_{\text{пп}}$, г/с	$G_{\text{вх}}/G_{\text{пп}}$
14	1,059	909,28	649,59	621,55	35,88	0,13	271,41
8	1,507	1049,74	729,28	665,84	35,64	1,27	27,97
12	1,678	1182,72	825,17	708,62	35,28	2,42	14,58
10	1,666	1348,15	816,42	786,32	35,79	4,08	8,77
16	1,712	1494,35	864,98	855,10	34,99	5,64	6,20
20	1,788	1620,38	935,10	910,33	35,53	6,49	5,48
18	1,772	1716,45	925,35	975,84	35,98	8,00	4,50

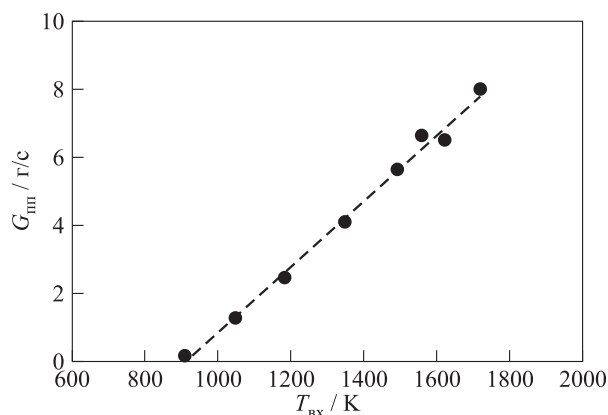
- давление торможения в потоке газа перед испытываемым образцом;
- температура торможения потока перед испытываемым образцом за ним.

Давление измеряется с помощью малогабаритных тензодатчиков давления, а температура — с помощью вольфрам-рениевых термопар. Для определения расхода подаваемых газов проводится расчет зависимости давления от времени при адиабатическом истечении газа из емкости известного объема V через критическое отверстие с постоянной площадью F^* для известных значений начального давления P_0 и начальной температуры T_0 в емкости (начальная температура газа равна комнатной температуре $T_0 = 290$ К) [15]. Точность определения расходов газов составляет 1%.

Средний выход продуктов газификации из УБ за время режима газификации определяется как $G_{\text{пп}} = \Delta m / t_{\text{гор}}$, где Δm — изменение массы УБ за режим, $t_{\text{гор}}$ — время режима газификации образца. Изменение массы Δm определяется при помощи контрольного взвешивания образца до и после опыта на лабораторных весах с точностью 0,02 г. Время режима газификации определяется из графика температуры на выходе из УБ, при этом началом рабочего режима считается момент подъема температуры до 600 К, а окончанием — момент выключения подачи азота (2300 мс). За это же время производится осреднение измеряемых значений температуры и давления в газогенераторе.

Типичные записи давления и температуры в экспериментах с газификацией УБ приведены на рис. 3. Результаты, осредненные по времени рабочего режима, приведены в табл. 1.

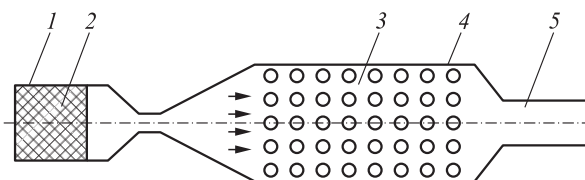
Во всех опытах расход и плотность тока несущего газа внутри УБ остаются примерно постоянными: $G_{\text{вх}} = 35\text{--}36$ г/с; $(\rho V)_{\text{вх}} = 26\text{--}26,8$ г/с/см². Из рис. 4 видно, что при увеличении температуры на входе в УБ от 910 до 1720 К выход продуктов


Рис. 4 Зависимость выхода продуктов газификации от температуры несущего газа на входе в УБ

газификации увеличивается от ~ 0 до 8 г/с. Таким образом, при максимальной температуре рабочего газа отношение среднего расхода несущего газа к расходу продуктов газификации достигает 4,5.

Крупномасштабная установка

С целью проверки влияния масштабного фактора проведены испытания с использованием крупномасштабного стендового газогенератора (СГГ). В первом варианте исполнения (далее — СГГ-1) реализована двухкамерная схема, предложенная в [10] и показанная на рис. 5. Согласно [10] первая ка-


Рис. 5 Схема двухкамерного газогенератора [10]: 1 — камера активного вещества; 2 — твердотопливный заряд; 3 — блок углеводородного материала; 4 — камера газификации; 5 — выход продуктов газификации

мера 1 содержит твердотопливный заряд 2, а вторая камера 4 (камера газификации) заполнена легкоплавким углеводородным материалом 3. При горении заряда 2 создается высокотемпературный поток газов из камеры 1. Этот поток газов омывает поверхность углеводородного материала (не способного к самостоятельному горению), размещенного в камере 4. За счет высокой температуры легкоплавкий материал подвергается газификации (испарению или сублимации) и через выводной канал 5 продукты газификации подаются в камеру дожигания, где происходит их смешение с воздухом и сгорание.

Конструктивная схема двухкамерного стендового газогенератора СГГ-1 показана на рис. 6.

В процессе эксперимента продукты сгорания модельного заряда 2 через сопло 3 камеры активного вещества поступают в камеру газификации 4, где расположен блок углеводородного материала 5 в виде цилиндрической трубы диаметром 75×90 мм и длиной 687 мм. Для организации более равномерного потока продуктов сгорания в канале углеводородного материала между сопловой крышкой камеры активного вещества и УБ установлена теплоизолированная цилиндрическая секция (вставка) длиной 280 мм. Образующаяся смесь продуктов сгорания модельного заряда и продуктов газификации УБ истекает через сопло 8 диаметром 13 мм

в атмосферу. Применение дросселирующего сопла 8 обеспечивает дозвуковую скорость потока в камере дожигания — скорость на входе в УБ составляет 16,0 м/с, скорость на выходе — 6,4 м/с. На выходе камеры газификации в цилиндрической части соплового блока 6 имеются патрубки 7 для датчиков температуры и давления газового потока.

Во втором варианте исполнения (далее — СГГ-2) заряд безметалльного твердого топлива и УБ размещаются в одной камере, имеющей выходное сопловое отверстие с диаметром критического сечения 6 мм. Конструктивная схема двухкамерного стендового газогенератора во втором варианте исполнения показана на рис. 7 и отличается от схемы на рис. 6 отсутствием сопловой крышки 3 и вставки 4.

Оба варианта СГГ комплектуются модельными зарядами из безметалльного твердого топлива, содержащего 81,5% перхлората аммония (ПХА) и 18,5% углеводородного связующего. В качестве легкоплавкого горючего используется полиэтилен низкого давления $(C_2H_4)_n$ в виде толстостенной трубы (далее — УБ).

Основные характеристики объектов испытаний и результаты испытаний их в составе установок приведены в табл. 2.

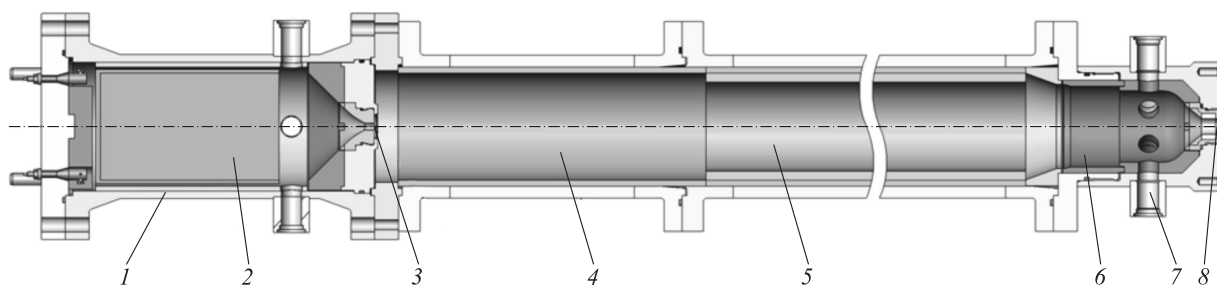


Рис. 6 Конструктивная схема СГГ-1: 1 — камера активного вещества; 2 — модельный заряд; 3 — сопло камеры активного вещества; 4 — вставка; 5 — блок углеводородного материала; 6 — сопловой блок; 7 — патрубки для замера давления и температуры продуктов газификации; 8 — сопловой блок камеры газификации

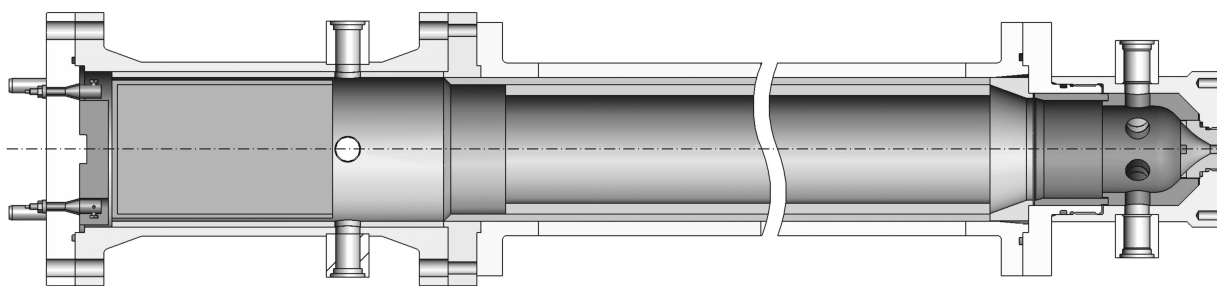


Рис. 7 Конструктивная схема СГГ-2

Таблица 2 Результаты испытаний стендовых газогенераторов

Модельный заряд твердого топлива			
СГГ	Диаметр по топливу, мм	Длина по топливу, мм	Масса топлива, кг
1	90	150	1,525
2	90	150	1,530

УБ				
СГГ	Диаметр внешний, мм	Диаметр канала, мм	Длина, мм	Масса УБ до испытания, кг
1	90	75	687	1,230
2	90	80	690	0,833

Камера с модельным зарядом твердого топлива				
СГГ	Полное время горения модельного заряда, с	Среднее интегральное давление, $P_{ср}$, бар	Средний интегральный расход продуктов сгорания безметаллического твердого топлива $G_{тт}$, кг/с	Температура продуктов сгорания (расчет), К
1	35,464	22,78	0,04342	2350
2	34,354	22,94	0,04454	2350

Камера с УБ						
СГГ	Среднее интегральное давление, бар	Средняя интегральная температура потока на выходе из УБ, К	Плотность тока в УБ, г/с/см ²	Масса УБ после испытания, кг	Средний интегральный расход продуктов газификации $G_{уб}$, г/с	Отношение расходов продуктов сгорания топлива и продуктов газификации УБ, $G_{тт}/G_{уб}$
1	4,11	940	0,983	1,040	5,36	8
2	22,94	1200	0,886	0,526	8,94	5

На рис. 8 показаны экспериментальные зависимости давления в камере сгорания МГГ и камере с УБ от времени, полученные по результатам испытаний СГГ.

На рис. 9 показана экспериментальная зависимость температуры продуктов сгорания на выходе из камеры газификации с УБ по времени рабочего режима, полученная в ходе испытания СГГ-1.

Осмотр УБ после испытания СГГ-1 показывает, что толщина полиэтилена на входе уменьшается до ~ 3 мм. На длине 210 мм толщина стенки УБ линейно увеличивается до исходного значения 7,5 мм. Масса газифицированного (унесенного) материала УБ за время эксперимента составляет 190 г при среднем расходе продуктов газификации 5,36 г/с.

После испытания СГГ-2 толщина стенки УБ на входе уменьшается до ~ 1–1,5 мм (вместо исходных 5 мм) и на длине 600 мм монотонно увеличивается до исходных 5 мм. На внутренней поверхности УБ присутствуют наплывы. В выходной, обращенной к соплу, части блока толщина стенки превышает исходные 5 мм на 0,2–0,4 мм, края

стенки оплавлены и существенно деформированы. Масса газифицированного (унесенного) углеводородного материала за время эксперимента составляет 307 г при среднем расходе продуктов газификации 8,94 г/с. Отношение средних расходов несущего газа (продуктов сгорания твердого топлива) и продуктов газификации полиэтилена в эксперименте с СГГ-1 составляет ~ 8, в эксперименте с СГГ-2 — ~ 5.

Продукты сгорания, истекающие в атмосферу в процессе работы СГГ-1, имеют светлый (белесый) цвет. В процессе работы СГГ-2 истекающие продукты сгорания имеют существенно более темный цвет (темно-серый), что свидетельствует о присутствии в них конденсированного углерода (сажи). Средняя за процесс температура газовой смеси в предсопловом объеме на выходе из УБ в ходе испытания СГГ-1 составляет 930–940 К, в ходе испытания СГГ-2 — 1150–1200 К.

Согласно данным [10, 16] при температуре ниже 1000 К в продуктах газификации полиэтилена преимущественно содержатся такие компоненты,

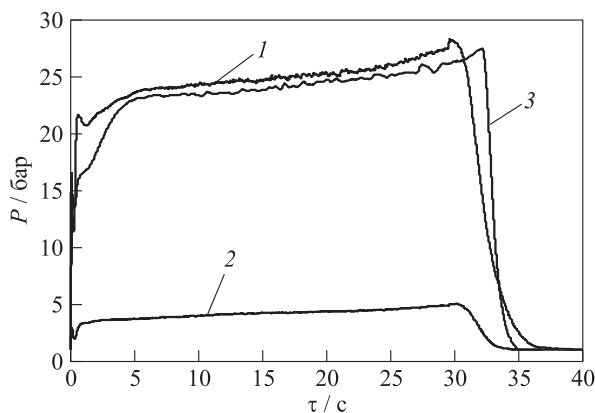


Рис. 8 Экспериментальные зависимости давления от времени: 1 — камера сгорания СГГ-1; 2 — камера УБ СГГ-1; 3 — камера сгорания с УБ СГГ-2

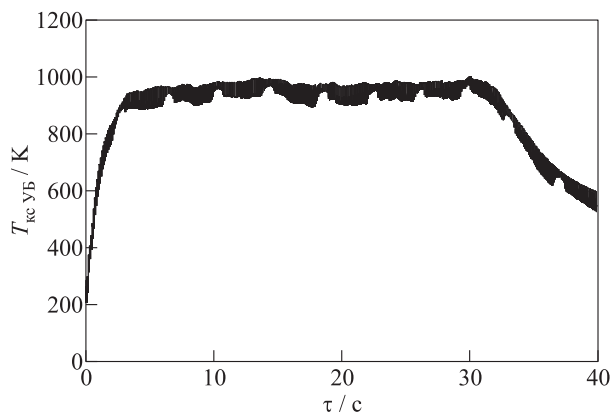


Рис. 9 Изменение температуры на выходе из камеры газификации с УБ СГГ-1

как C_2H_4 , C_5H_{10} , C_6H_{12} , C_9H_{18} и $C_{10}H_{20}$, и практически отсутствует конденсированный углерод. При температурах свыше 1000 К происходит крекинг продуктов газификации с образованием H_2 и C_2H_2 и интенсивное коксообразование.

Отметим, что в условиях МГГ СГГ-2 углеводородный блок размещается в той же камере, где генерируется несущий газ (продукты сгорания). Несмотря на существенное различие в размерах образцов УБ в экспериментах с МГГ и СГГ-2 при близких температурах несущего газа на входе в УБ, получены близкие отношения расходов несущего газа и продуктов газификации УБ: 4,5 — для МГГ (см. табл. 1) и 5 — для СГГ (см. табл. 2).

Таким образом, экспериментально установлено, что для газификации 1 кг материала УБ из ПП или полиэтилена требуется пропустить через него $\sim 4,5$ –5 кг несущего газа с температурой ~ 1720 –2350 К.

Результаты экспериментов показывают, что применение схемы РПД с ЛПГ дает возможность получить продукты газификации с низкой температурой (менее 1000 К), что позволяет использовать их для решения задачи охлаждения силовых элементов конструкции ЛА, но не приводит к повышению эффективности рабочего процесса двигательной установки по критериям массовых и энергетических характеристик.

Литература

1. Karabeyoglu A., Ziliac G., Cantwell B.J., DeZilwa S., Castellucci P. Scale-up tests of high regression rate paraffin-based hybrid rocket fuels // *J. Propul. Power*, 2004. Vol. 20. No. 6. P. 1037–1045. doi: 10.2514/1.3340.
2. Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верховолов В. К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактив-

ные двигатели на твердых топливах. — М.: Академкнига, 2006. 329 с.

3. Besser H.-L. History of ducted rocket development at Bayern-Chemie. AIAA Paper No. 2008-5261, 2008. doi: 10.2514/6.2008-5261.
4. Pinto P.C., Kurtha G. Robust propulsion control in all flight stages of a throttleable ducted rocket. AIAA Paper No. 2011-5611, 2011. doi: 10.2514/6.2011-5611.
5. Обносов Б. В., Сорокин В. А., Яновский Л. С. и др. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 279 с.
6. Салганский Е. А., Кислов В. М., Глазов С. В., Жолудев А. Ф., Манелис Г. Б. Особенности фильтрационного горения пиролизующегося твердого топлива // *Физика горения и взрыва*, 2010. Т. 46. № 5. С. 42–47.
7. Шабунин А. И., Калинин С. В., Сарабьев В. И., Ягодников Д. А., Полянский А. Р. Результаты исследования и разработки низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив для систем перемещения элементов исполнительных механизмов // *Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2012. № 2. С. 20.
8. Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Ильченко М. А., Ананян М. В. Исследование эффективности рабочего процесса в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного воздушного потока // *Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2015. № 8. С. 75–86. doi: 10.7463/0815.0798965.
9. Яновский Л. С., Байков А. В., Аверьков И. С. Оценка возможности создания ВРД на твердом топливе с системой активного охлаждения // *Тепловые процессы в технике*, 2016. № 3. С. 111–116.
10. Аверьков И. С., Арефьев К. Ю., Байков А. В., Яновский Л. С. Исследование эффективности регенеративного охлаждения прямоточной камеры сгорания продуктами газификации энергоконденсированно-

- го материала // Теплофизика и аэромеханика, 2017, Т. 24. № 1. С. 149–160.
11. Левин В. А., Луценко Н., Салганский Е., Яновский Л. Модель газификации твердого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата // Докл. Акад. наук, 2018. Т. 482. № 2. С. 150–154.
 12. Salgansky E. A., Lutsenko N. A., Levin V. A., and Yanovskiy L. S. Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine // *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019. Vol. 84. No. 1. P. 31–36. doi: 10.1016/j.ast.2018.10.029.
 13. Polymer handbook / Eds. J. Brandrup, E. H. Immergut, E. A. Grulke, A. Abe, D. R. Bloch. — 4th ed. — New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1999. 2250 p.
 14. Фролов С. М., Звегинцев В. И., Аксёнов В. С., Билера И. В., Казаченко М. В., Шамшин И. О., Гусев П. А., Белоцерковская М. С., Коверзанова Е. В. Детонационная способность воздушных смесей продуктов пиролиза полипропилена // *Горение и взрыв*, 2018. Т. 11. № 4. С. 44–60. doi: 10.30826/CE18110406.
 15. Беляев Н. М. Термодинамика переменного количества газа. — Днепропетровск: Днепропетр. гос. ун-т, 1981. 110 с.
 16. Байков А. В., Пешкова А. В., Шиховцев А. В., Яновский Л. С. Экспериментальные исследования низкотемпературного твердотопливного газогенератора для воздушно-реактивного двигателя // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 4. С. 126–131.

Поступила в редакцию 16.07.19

GASIFICATION OF LOW-MELTING HYDROCARBON MATERIALS IN HIGH-TEMPERATURE GAS FLOW

V. I. Zvegintsev¹, A. V. Fedorychev², D. V. Zhesterev², I. R. Mishkin², and S. M. Frolov^{3,4}

¹S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation

²FSUE “The Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz,” 42 Akademika Zhukova Str., Dzerzhinsky, Moscow Region 140090, Russian Federation

³N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

⁴National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: The experiments are carried out and the quantitative characteristics of the process of gasification of low-melting hydrocarbon materials (polyethylene and polypropylene) in the flow of high-temperature inert gas are determined. The yield of gasification products is shown to increase with the carrier gas temperature and with the completeness of heat removal to the material. The minimum attained value of the ratio between the mass flow rates of the carrier gas and gasification products in the experiments is 4.5.

Keywords: low-melting fuel; inert gas; gas generator; high-temperature carrier gas flow; gasification products

DOI: 10.30826/CE19120312

Acknowledgments

This work was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research for the Russian State Academies of Sciences in 2013–2020 (project No. AAAA-A17-117030610121-9) and was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-08-00076a).

References

1. Karabeyoglu, A., G. Zilliac, B. J. Cantwell, S. DeZilwa, and P. Castellucci. 2004. Scale-up tests of high regression rate paraffin-based hybrid rocket fuels. *J. Propul. Power* 20(6):1037–1045. doi: 10.2514/1.3340.
2. Aleksandrov, V. N., V. M. Bytskevich, V. K. Verkholomov, et al. 2006. *Integral'nye pryamotokhnnye vozdušno-reaktivnye dvigateli na tverdykh toplivakh* [Integral ramjets on solid propellants]. Moscow: Akademkniga Publ. 329 p.
3. Besser, H.-L. 2008. History of ducted rocket development at Bayern-Chemie. AIAA Paper No. 2008-5261. doi: 10.2514/6.2008-5261.
4. Pinto, P. C., and G. Kurtha. 2011. Robust propulsion control in all flight stages of a throttleable ducted rocket. AIAA Paper No. 2011-5611. doi: 10.2514/6.2011-5611.
5. Obnosov, B. V., V. A. Sorokin, L. S. Yanovskii, et al. 2012. *Konstruktsiya i proektirovanie kombinirovannykh raketnykh*

- dvigateley na tverdom toplive* [Construction and design of combined solid propellant rocket engines]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ. 279 p.
- Salganskii, E. A., V. M. Kislov, S. V. Glazov, A. F. Zholudev, and G. B. Manelis. 2010. Specific features of filtration combustion of a pyrolyzed solid fuel. *Combust. Expl. Shock Waves* 46(5):528–532. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10573-010-0069-6> (accessed August 29, 2019).
 - Shabunin, A. I., S. V. Kalinin, V. I. Sarabiev, D. A. Yagodnikov, and A. R. Polyanskii. 2012. Rezul'taty issledovaniya i razrabotki nizkotemperaturnykh bystrogoryaschikh gazogeneriruyuschikh topliv dlya sistem peremeshcheniya elementov ispolnitel'nykh mekhanizmov [The results of R&D of low-temperature fast-burning gas-generating fuels for the displacement systems of actuator elements]. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana* [Science and Education: Bauman Moscow State Technical University Scientific Publication] 2:20.
 - Aleksandrov, V. Yu., K. Yu. Arefiev, M. A. Il'chenko, and M. V. Ananyan. 2015. Issledovanie effektivnosti rabochego protsessa v malogabaritnykh generatorakh vysokenthal'piynogo vozdušnogo potoka [Study of the efficiency of the operation process in small-sized generators of high-enthalpy airflow]. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana* [Science and Education: Bauman Moscow State Technical University Scientific Publication] 8:75–86. doi: 10.7463/0815.0798965.
 - Yanovskii, L. S., A. V. Baikov, and I. S. Aver'kov. 2016. Otsenka vozmozhnosti sozdaniya VRD na tverdom toplive s sistemoy aktivnogo okhlazhdeniya [Assessment of the possibility of creating a solid-fuel ramjet with an active cooling system]. *Teplovy protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering] 3:111–116.
 - Averkov, I. S., K. Yu. Arefiev, A. V. Baikov, and L. S. Yanovskii. 2017. Investigation of the efficiency of regenerative cooling of the ramjet combustor by gasification products of ebergy-intensive material. *Thermophys. Aeromech.* 24(1):147–158. doi: 10.1134/S0869864317010164.
 - Levin, V. A., N. A. Lutsenko, E. A. Salgansky, and L. S. Yanovskiy. 2018. A model of solid-fuel gasification in the combined charge of a low-temperature gas generator of a flying vehicle. *Dokl. Phys.* 63(9):375–379. doi: 10.1134/S1028335818090057.
 - Salgansky, E. A., N. A. Lutsenko, V. A. Levin, and L. S. Yanovskiy. 2019. Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine. *Aerosp. Sci. Technol.* 84(1):31–36. doi: 10.1016/j.ast.2018.10.029.
 - Brandrup, J., E. H. Immergut, E. A. Grulke, A. Abe, and D. R. Bloch, eds. 1999. *Polymer handbook*. 4th ed. New York, NY: John Wiley & Sons. 2250 p.
 - Frolov, S. M., V. I. Zvegintsev, V. S. Aksenov, I. V. Biler, M. V. Kazachenko, I. O. Shamshin, P. A. Gusev, M. S. Belotserkovskaya, and E. V. Koverzanova. 2018. Detonatsionnaya sbosobnost' vozdušnykh smesey produktov piroliza polipropilena [Detonability of air mixtures of the polypropylene pyrolysis products]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 11(4):44–60. doi: 10.30826/CE18110406.
 - Belyaev, N. M. 1981. *Termodinamika peremennogo kolichestva gaza* [Thermodynamics of varied amount of gas]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk State University. 110 p.
 - Baykov, A. V., A. V. Peshkova, A. V. Shihovtsev, and L. S. Yanovskiy. 2016. Eksperimental'nye issledovaniya nizkotemperaturnogo tverdoplivnogo gazogeneratora dlya vozdušno-reaktivnogo dvigatelya [Experimental study of the low-temperature solid-propellant gas generator for ramjet]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(4):126–130.

Received July 16, 2019

Contributors

Zvegintsev Valery I. (b. 1944) — Doctor of Science in technology, chief research scientist, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation; zvegin@itam.nsc.ru

Fedorychev Alexander V. (b. 1956) — head of laboratory, FSUE “The Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz,” 42 Akademika Zhukova Str., Dzerzhinsky, Moscow Region 140090, Russian Federation; dgr56@mail.ru

Zhesterev Denis V. (b. 1985) — team leader, FSUE “The Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz,” 42 Akademika Zhukova Str., Dzerzhinsky, Moscow Region 140090, Russian Federation; d_zhesterev@mail.ru

Mishkin Ilya R. (b. 1988) — lead design engineer, FSUE “The Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz,” 42 Akademika Zhukova Str., Dzerzhinsky, Moscow Region 140090, Russian Federation; mir1988@mail.ru

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, head of laboratory, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru