

УДК 536.46

ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

П. К. Третьяков¹, А. В. Тупикин¹, А. Л. Куранов², С. В. Колосенок²,
А. А. Саваровский², В. М. Абашев³

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, paveltr@itam.nsc.ru

²Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем (ХК «Ленинец»),
196066 Санкт-Петербург

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993 Москва

Представлено экспериментальное подтверждение интенсификации горения керосина при использовании смеси, моделирующей продукты паровой конверсии, в модельной камере сгорания со сверхзвуковой скоростью потока на входе. Показано, что применяемая смесь по сравнению с этиленом обладает более высокой химической активностью. Применение продуктов паровой конверсии углеводородных или синтетических топлив в схемах с импульсно-периодическим управлением режимом горения ведет к повышению полноты сгорания без применения специальных конструктивных решений по организации инициирования и стабильного горения.

Ключевые слова: прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД), рабочий процесс, полнота сгорания топлива, потери давления, камера сгорания (КС).

DOI 10.15372/FGV20200504

Можно выделить ряд основополагающих проблем, без решения которых невозможно создание двигателя для высокоскоростного летательного аппарата [1]. Реализация высокой эффективности применения углеводородного топлива требует специальных условий, обеспечивающих устойчивое и стабильное горение [2]. Этому может способствовать, например, использование процесса эндотермической конверсии топлив, в частности керосина [3]. Так, применение метода паровой конверсии, с одной стороны, решает проблему активного охлаждения камеры сгорания (КС), а с другой — дает возможность улучшения инициирования горения при применении газодинамического импульсно-периодического воздействия на структуру потока в КС. Целью работы являлось проведение экспериментов в

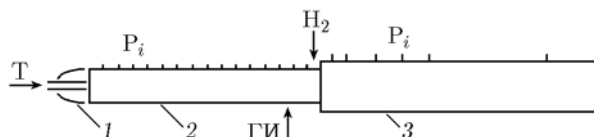


Рис. 1. Схема КС:

1 — сопло $\varnothing 50$ мм, 2 — участок КС постоянного сечения $\varnothing 50$ мм и длиной 423 мм, 3 — часть с внезапным расширением $\varnothing 90$ мм и длиной 513 мм, Т — подача топлива, ГИ — генератор импульсов, H₂ — подача водорода, P_i — место измерения давления

модельной КС с параметрами на входе, соответствующими полету летательного аппарата с числом Маха $M \approx 6.0$, с интенсификацией горения керосина продуктами паровой конверсии путем импульсно-периодического воздействия на процессы в КС. Схема КС представлена на рис. 1. Подогрев воздуха осуществлялся в электродуговом подогревателе. Требуемая температура устанавливалась в форкамере перед соплом путем смешения с холодным воздухом.

В качестве синтез-газа применялся один из возможных вариантов объемного состава продуктов паровой конверсии керосина: H₂ — 47.9 %, CH₄ — 15.8 %, CO — 31.3 % и CO₂ —

Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект № АААА-А17-117030610135-6) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00245).

© Третьяков П. К., Тупикин А. В., Куранов А. Л., Колосенок С. В., Саваровский А. А., Абашев В. М., 2020.

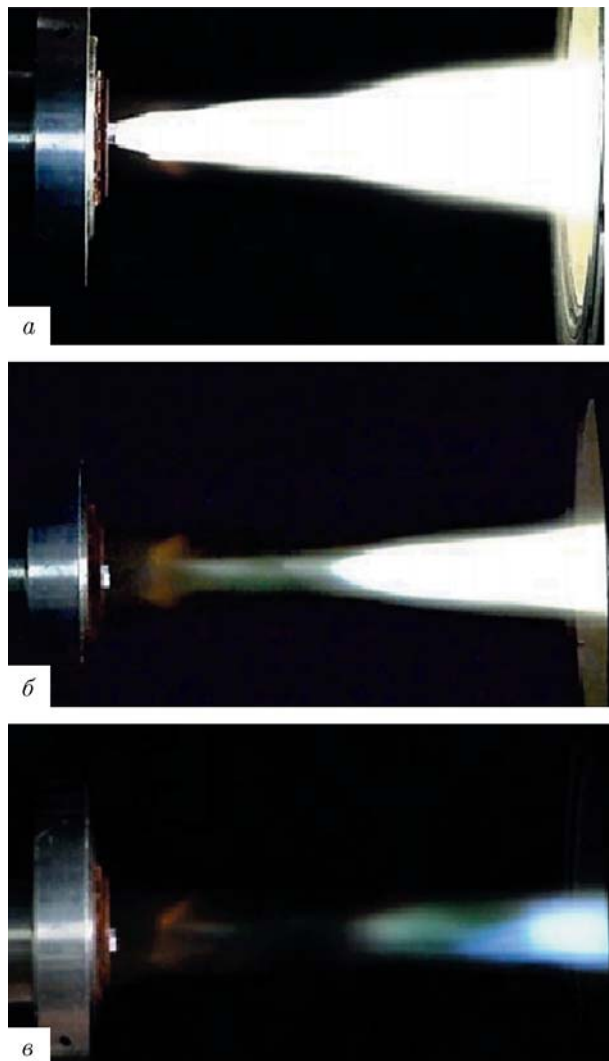


Рис. 2. Прямая фотография пламени (КС отсоединена от сопла):

a — водород, *б* — синтез-газ, *в* — этилен

5 %. Стехиометрический коэффициент — 10.84. Эксперименты проводились с керосином марки ТС-1. Параметры на входе в КС: число Маха $M = 2.2$; полное давление $p_0/T_0 \approx 0.7$ МПа; температура торможения ≈ 1650 К. Установлено, что при этих параметрах происходят воспламенение и устойчивое горение синтез-газа. На рис. 2 приведены прямые фотографии пламени водорода, синтез-газа и этилена в свободном сверхзвуковом потоке при одинаковых параметрах воздушного потока и одинаковых скоростных напорах водорода, синтез-газа и этилена (давления перед инжектором). Рис. 2 иллюстрирует воздействие потока на воспламенение. Видно, что синтез-газ имеет меньшую

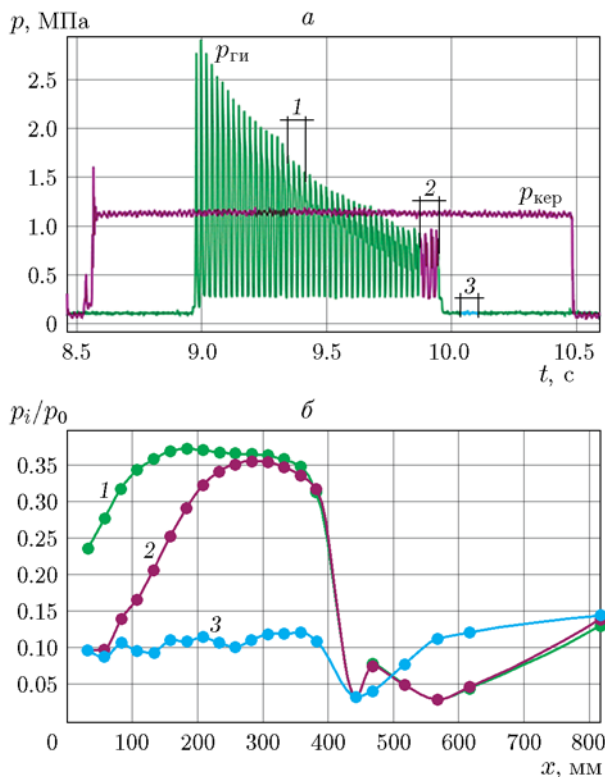


Рис. 3. Циклограмма (*a*) и распределение относительного давления вдоль КС (*б*) при использовании воздуха в ГИ:

$p_{ГИ}$, $p_{кер}$ — давление в ГИ и системе подачи керосина, 1 — область иницирования и развития интенсивного горения, 2 — область квазистационарного пульсирующего режима горения, 3 — срыв горения

задержку воспламенения и горит более интенсивно, чем этилен. Эксперимент также показал, что присоединение пламени синтез-газа к кромке инжектора происходит при большем скоростном напоре, чем у этилена, приблизительно в 4 раза, и меньшем, чем у водорода, примерно в 1.5 раза. Этот факт также свидетельствует о более высокой химической активности синтез-газа по сравнению с этиленом.

Была проведена серия экспериментов по изучению возможности применения синтез-газа для интенсификации горения керосина в камере сгорания (схема представлена на рис. 1) со сверхзвуковой скоростью воздушного потока. Сравнение выполнено с отработанным ранее способом интенсификации, основанным на импульсно-периодическом газодинамическом воздействии с применением пакета воздушных импульсов переменной энергии. На рис. 3 приведены циклограмма испытаний

при использовании генератора воздушных импульсов и результаты регистрации распределения давления вдоль КС. Параметры режима: $p_0 = 0.69$ МПа, $T_0 = 1650$ К, частота импульсов 45 Гц, длительность импульса 12 мс, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 5.69$. Необходимо отметить, что коэффициент избытка воздуха для керосина во всех экспериментах выбирался таким образом, чтобы при полном сгорании керосина среднее значение числа Маха на выходе из КС постоянного сечения было близко к $M \approx 1.0$. Изменение давления на стенке во временных интервалах, соответствующих выделенным на циклограмме областям при постоянном расходе керосина, характеризует развитие и протекание процесса горения, а также срыв пламени после отключения подачи импульсов.

На рис. 4 приведены циклограмма испытаний при использовании генератора импульсов

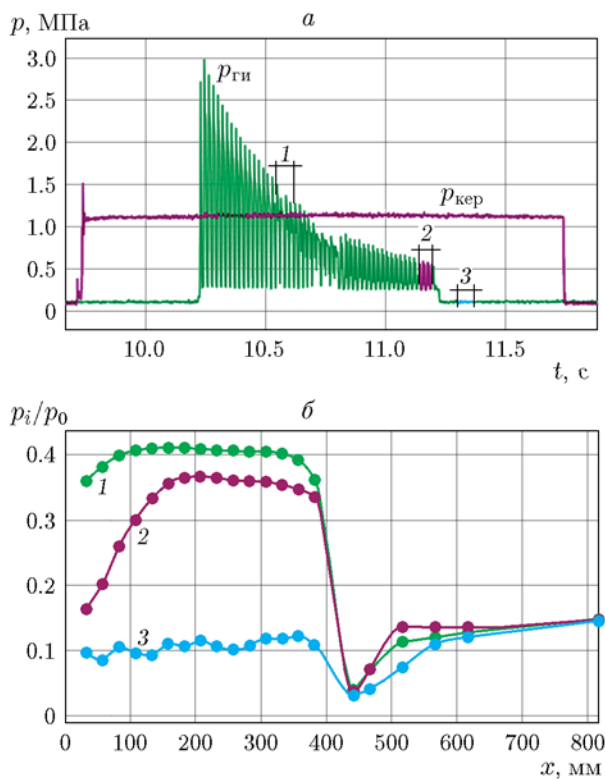


Рис. 4. Циклограмма (а) и распределение относительного давления вдоль КС (б) при использовании синтез-газа в ГИ:

$p_{\text{ГИ}}$, $p_{\text{кер}}$ — давление в ГИ и системе подачи керосина, 1 — область инициирования и развития интенсивного горения, 2 — область квазистационарного пульсирующего режима горения, 3 — срыв горения

синтез-газа и результаты регистрации распределения давления вдоль КС. Параметры режима: $p_0 = 0.69$ МПа, $T_0 = 1660$ К, частота импульсов 52 Гц, длительность импульса 10 мс, $\alpha = 5.80$.

Как следует из сравнения результатов, приведенных на рис. 3 и 4, синтез-газ может быть использован для инициирования и интенсификации горения керосина в сверхзвуковом потоке на участке КС постоянного сечения при отсутствии специальных устройств для стабилизации пламени. Следует отметить, что для реализации квазистационарного пульсирующего режима горения в случае применения газодинамических импульсов, создаваемых синтез-газом, требуется примерно в два раза меньшее давление в газогенераторе. Это свидетельствует об увеличении энергии в импульсах вследствие возможного горения синтез-газа.

В работах [4–7] исследовался новый способ организации рабочего процесса. Режим интенсивного горения возбуждался импульсно-периодическим газодинамическим воздействием на структуру течения в КС. Показано, что режим характеризуется малой протяженностью зоны горения и высокой полнотой сгорания. Также изучалась возможность сохранения интенсивного горения в канале КС постоянного сечения при отключении воздействия воздушными импульсами после организации горения в расширяющейся части КС. Ниже приведены результаты эксперимента по реализации интенсивного режима горения газодинамическими импульсами синтез-газа и возможности его сохранения путем организации горения водорода в расширяющейся части КС после отключения воздействия (схему КС см. на рис. 1). Водород подавался на входе в канал с внезапным расширением через 32 отверстия диаметром 2 мм, расположенные равномерно по окружности. На рис. 5 приведены циклограмма испытаний при использовании генератора импульсов синтез-газа и результаты регистрации распределения давления вдоль КС. Параметры режима: $p_0 = 0.7$ МПа, $T_0 = 1630$ К, частота 45 Гц, длительность 12 мс, коэффициенты избытка воздуха: по керосину $\alpha_{\text{кер}} = 5.46$, по водороду $\alpha_{\text{H}_2} = 13.79$, суммарный $\alpha_{\text{сум}} = 3.9$. На рис. 5,а показано изменение расходов керосина и водорода, а также давления в генераторе импульсов в течение эксперимента. Цифрами отмечены временные интервалы, для которых на рис. 5,б приведены распределения давления

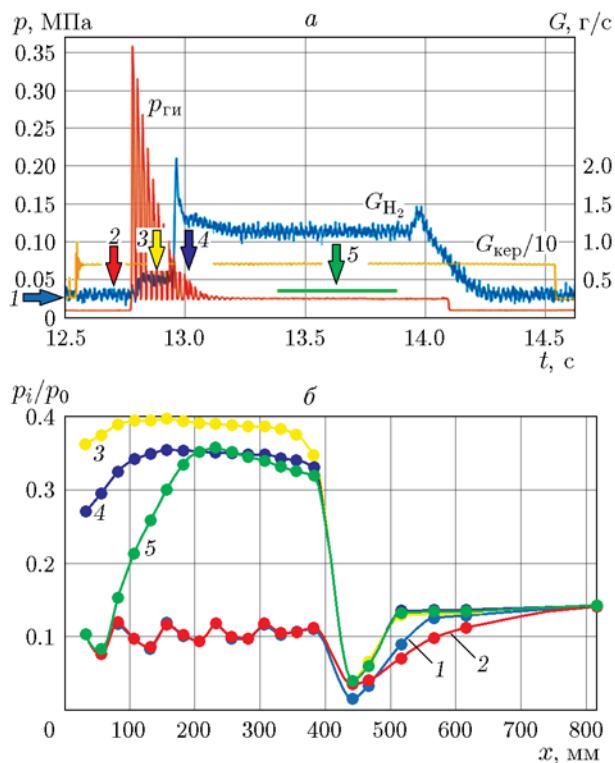


Рис. 5. Циклограмма (а) и распределение относительного давления вдоль КС (б) при использовании синтез-газа в ГИ:

$p_{ги}$, G_{ker} , G_{H_2} — давление в ГИ, расходы керосина и водорода, 1 — после выхода на режим по параметрам на входе в канал, 2 — подача керосина, 3 — область инициирования и развития интенсивного горения, 4 — квазистационарный пульсирующий режим горения с горением водорода в расширяющейся части канала, 5 — режим горения после отключения импульсов с горением водорода

по длине КС. Результаты подтверждают возможность реализации интенсивного горения на участке КС постоянного сечения при отключении подачи импульсов и моделировании теплоподвода от процесса горения керосина в расширяющейся части КС горением водорода.

В заключение следует отметить, что реализация приведенного способа интенсификации горения с использованием продуктов паровой конверсии углеводородных или синтетических топлив [3, 8] позволит повысить полноту сгорания без применения специальных конструктивных решений для организации инициирования и стабильного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abashev V. M., Korabelnikov A. V., Kuranov A. L., Tretyakov P. K. Hypersonic hydrocarbon fuel vehicle with $M = 6+$ // HiSST: Int. Conf. on High-Speed Vehicle Science Technology (Moscow, Russia, 26–29 November 2018): Proc. — S.l., 2018. — N 2018_2240912. — P. 1–10.
2. Yu G., Li J. G., Chang X. Y., Chen L. H., Sung C. J. Fuel injection and flame stabilization in a liquid-kerosene-fueled supersonic combustor // J. Propul. Power. — 2003. — V. 19, N 5. — P. 885–893.
3. Куранов А. Л., Корабельников А. В., Михайлов А. М. Конверсия углеводородного топлива в элементах теплозащиты гиперзвукового летательного аппарата // ТВТ. — 2016. — Т. 54, № 3. — С. 423–429.
4. Третьяков П. К., Забайкин В. А., Прохоров А. Н. Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 августа 2015 г.: сб. тр. — С. 3778–3780.
5. Третьяков П. К. Некоторые особенности формирования тракта ГПВРД // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред, 16–18 ноября 2016 г., Москва: сб. тр. 6-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского. — Т. II. — С. 26–33.
6. Третьяков П. К., Крайнев В. Л., Постнов А. В., Тупикин А. В. Способ перехода работы ПВРД на режим ГПВРД // АКТО: Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 8–10 августа 2018 г.: материалы докл. — Казань, 2018. — Т. 1. — С. 291–295.
7. Третьяков П. К., Прохоров А. Н. Сверхзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель с пульсирующим режимом запуска (СПВРД с ПРЗ) и способ его работы: пат. RU 2651016.
8. Shen C. C., Jian T. Y., Wang Y. T. Steam reforming of methanol in a compact copper microchannel foam reactor // Fuel Cells. — 2013. — V. 13, N 6. — P. 965–970.

Поступила в редакцию 05.12.2019.

После доработки 24.12.2019.

Принята к публикации 24.12.2019.