

УДК 621.452.225

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА ПАКЕТОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

П. К. Третьяков

Представлено академиком РАН В.А. Левиным 17.05.2019 г.

Поступило 25.04.2019 г.

Предложен способ и экспериментально подтверждена возможность его реализации для инициирования горения керосина в сверхзвуковом потоке воздуха в части камеры сгорания (КС) постоянного сечения. Режим интенсивного горения реализуется с применением пакета импульсов переменной энергии и сохраняется при отключении воздействия после организации горения в расширяющейся части КС.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, инициирование горения, камера сгорания, импульсно-периодическое воздействие, пакет газодинамических импульсов, полнота сгорания.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893250-253>

Интерес к организации горения керосина в сверхзвуковом потоке воздуха возник в связи с возможным применением углеводородного топлива в ПВРД для полёта летательных аппаратов (ЛА) со скоростью, в 5–6 раз (и более) превышающую скорость звука. Однако углеводородные топлива имеют сравнительно низкие скорости и узкие концентрационные пределы устойчивого горения по сравнению с водородом (реальность использования которого подтверждена в лётных испытаниях), поэтому для успешного применения требуется создание надёжных условий, обеспечивающих необходимое качество смешения, инициирование горения и высокую полноту сгорания. Известные экспериментальные исследования [1, 2] свидетельствуют о трудностях реализации высокой полноты сгорания, достижение которой невозможно без существенных гидравлических потерь. В работах [3–6] предложен и экспериментально реализован новый способ организации рабочего процесса, в котором по тракту двигателя после воздухозаборника в изоляторе (канале постоянного сечения) сохраняется сверхзвуковая скорость потока. Торможение до числа $M \approx 1,0$ в конце его достигается за счёт организации интенсивного (вплоть до “преддетонационного” [7]) режима выгорания части топлива в “псевдоскачке”. Остальное необходимое для полёта ЛА топливо сгорает в канале переменного сечения. Режим интенсивного горения возбуждается импульсно-периодическим газодинамическим воздействием на структуру течения в ка-

нале. Генератором может быть клапан, работающий на воздухе для создания пакета газодинамических импульсов заданной частоты, формы, энергии и длительности. Этот режим характеризуется малой протяжённостью зоны горения и высокой полнотой сгорания, а также возможностью сохранения стабильного горения при отключении внешнего воздействия после организации горения в расширяющейся части камеры сгорания (КС).

Выполненные на модельных КС (осесимметричных и плоских, см. [3–5, 8]) экспериментальные исследования с водородом и этиленом в качестве топлива подтвердили возможность реализации интенсивного режима горения и его сохранения при отключении воздействия. В [9] приведены особенности динамики изменения давления в КС при горении этилена. После воспламенения на некотором расстоянии от места подачи при включении генератора импульсов режим горения интенсифицируется. Подбором энергии в импульсе, его длительности, формы и скважности можно управлять положением области интенсивного горения в КС. В [5] для параметров потока, соответствующих полёту ЛА с числом Маха $M = 6,0$ в осесимметричной модельной КС, проведены поисковые эксперименты по горению керосина. Выполненная серия экспериментов с воздействием пакетом импульсов постоянной энергии показала возможность влияния на инициирование процесса.

Задачей исследования является поиск параметров пакета импульсов, обеспечивающих стабильность устойчивого воспламенения и интенсивного горения, а также условий сохранения этого режима при отключении внешнего воздействия после органи-

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения
Российской Академии наук, Новосибирск
E-mail: paveltr@itam.nsc.ru*

зации горения в расширяющейся части КС. Приводятся результаты, полученные в осесимметричных КС переменной геометрии, которые подтверждают возможность осуществления устойчивого режима горения керосина в сверхзвуковом потоке.

Схема одной из испытанных КС приведена на рис. 1. Параметры потока соответствовали полёту ЛА с числом Маха $M = 6,0$ (температура торможения ≈ 1650 К, скорость потока перед изолятором $M \approx 2,2$). Керосин подавался по оси (см. позицию K на рис. 1) КС через охлаждаемый водой инжектор с форсункой диаметром 0,6 мм.

Газодинамические импульсы от генератора (ГИ) вводились в конце участка постоянного сечения КС. Горение в канале с внезапным расширением осуществлялось после подачи водорода H_2 через 24 отверстия диаметром 1,5 мм перед входом в канал (рис. 1). В процессе эксперимента регистрировалось распределение давления P_i вдоль КС.

Циклограмма эксперимента представлена на рис. 2. Она отражает временную последовательность проведения эксперимента после установления параметров воздушного потока. Сначала подаётся керосин, затем вводится пакет импульсов, и через определённое время включается подача водорода. На циклограмме по вертикали отложено давление в соответствующих измерительных устройствах. Во-

дород был выбран как наиболее удобное топливо (с точки зрения простоты) для организации горения в расширяющейся части КС.

Следует отметить, что после большого количества проведённых экспериментов была определена форма пакета импульсов, особенность которой связана с развитием процесса воспламенения и реализацией пульсирующего квазистационарного режима интенсивного горения керосина. Как следует из циклограммы, пакет содержит импульсы с уменьшающейся энергией.

Импульсы с высокой энергией вызывают воспламенение и развитие процесса горения, а импульсы с энергией, уменьшенной примерно в три раза, поддерживают установившийся пульсирующий режим горения. Об этом свидетельствуют результаты изменения давления вдоль КС, представленные на рис. 3. Подача керосина в КС не сказывается на изменении давления, что свидетельствует об отсутствии в ней процесса горения. На фотографии прозрачного участка (см. фото 1) видна подсвеченная дугой плазматрона (подогревателя воздуха) струя керосина. Распределение давления (отнесённое к давлению в форкамере P_{ϕ}) за период осреднения 2 (рис. 2 и 3) характерно для псевдоскачка и отвечает установившемуся пульсирующему режиму горения в КС. Фото 2 подтверждает, что начало горения на-

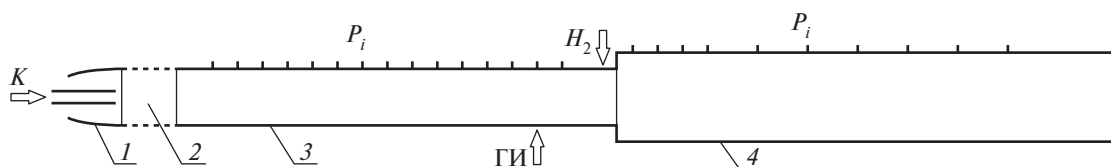


Рис. 1. Принципиальная схема камеры сгорания. 1 — сопло, 2 — прозрачная вставка, 3 — канал постоянного сечения, 4 — канал с внезапным расширением.

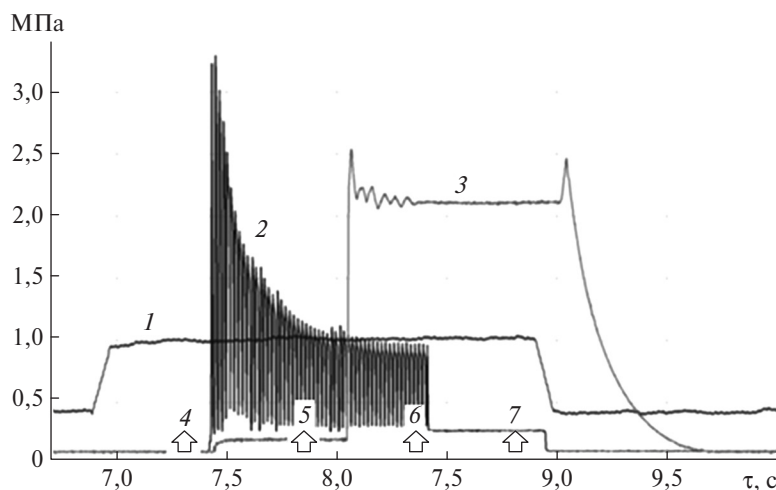


Рис. 2. Циклограмма проведения эксперимента. 1 — керосин, 2 — пакет импульсов, 3 — водород, 4–7 — характерные временные интервалы, в которых усреднялось распределение давления вдоль камеры.

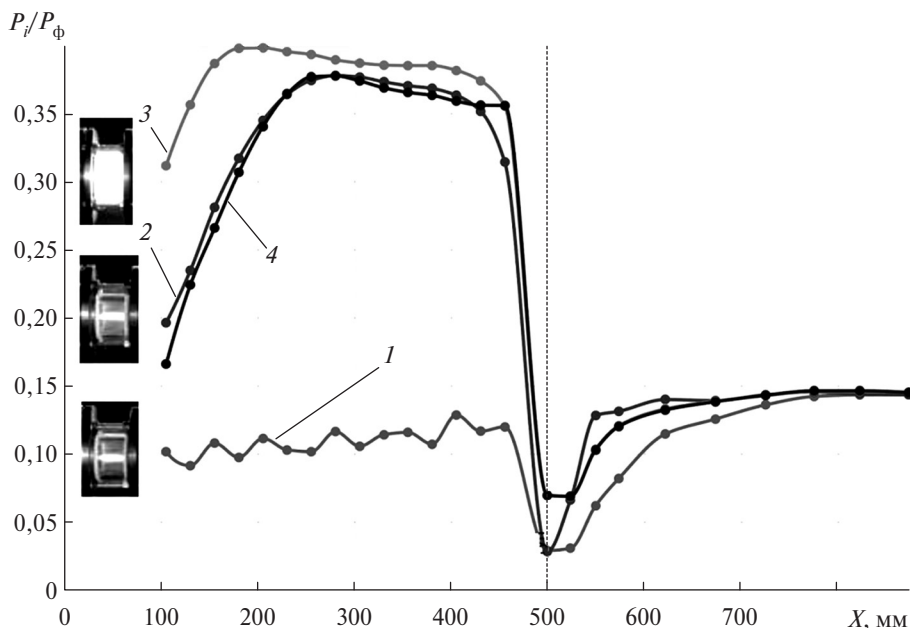


Рис. 3. Распределение относительного давления вдоль камеры сгорания: 1 — подача керосина в камеру при выходе на расчётный режим течения (фото 1); 2 — стационарный пульсирующий режим горения при воздействии пакетом импульсов (фото 2); 3 — режим при воздействии пакетом импульсов и при горении водорода в канале с внезапным расширением (фото 3); 4 — режим горения при отключении генератора импульсов. Осреднение за период Δt , с: 7,30–7,40 (1); 7,75–7,80 (2); 8,35–8,40 (3); 8,75–8,85 (4).

чинается на некотором расстоянии от сопла (за прозрачным участком).

При подаче водорода его горение в расширяющейся части КС в сочетании с воздействием импульсов приводит к перемещению интенсивного горения навстречу потоку. Это хорошо видно по появлению излучения из прозрачного участка (рис. 3, фото 3) и смещению псевдоскачка против потока. Горение водорода вызывает дополнительное гидравлическое сопротивление, которое приводит к наблюдаемому изменению в распределении давления по длине КС (рис. 3, кривая 3). При отключении подачи пакета импульсов (рис. 3, кривая 4) интенсивный режим горения сохраняется. Распределение давления на участке постоянного сечения совпадает с распределением при воздействии пакетом импульсов на режиме без подачи водорода.

Необходимо отметить, что был поставлен эксперимент, в котором полностью воспроизведены параметры в КС, но не было воздействия пакетом импульсов. При подаче керосина горение водорода не приводило к интенсивному режиму горения. В заключение можно сделать вывод, что так же, как для использования в качестве топлива водорода и этилена, для керосина подтверждена возможность реализации интенсивного режима горения в части КС постоянного сечения с применением пакета импульсов переменной энергии и его сохранение при от-

ключении воздействия после организации горения в расширяющейся части КС.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17–08–00183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев В.Н., Левин В.М., Волощенко О.В., Зосимов С.А., Николаев А.А. // Труды ЦАГИ. 2015. В. 2736. С. 35–43.
2. Александров В.Ю., Кукушкин Н.В. // ФГВ. 2016. Т. 52. № 3. С. 32–36.
3. Третьяков П.К., Забайкин В.А., Прохоров А.Н. Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска // Сб. тр. XI Всеросс. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20–24 августа 2015 г. Казань, 2015. С. 3778–3780.
4. Третьяков П.К. Некоторые особенности формирования тракта ГПВРД // Сб. тр. 6-й Всеросс. науч. конф. с междунар. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского “Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред”. Т. II. 16–18 ноября 2016 г. М., 2016. С. 26–33.
5. Третьяков П.К., Крайнев В.Л., Постнов А.В., Тупикин А.В. Способ перехода работы ПВРД на режим ГПВРД // АКТО: Всеросс. научно-практич. конф. с международным участием. Материалы докл. Т. 1. 8–10 августа 2018 г. Казань, 2018. С. 291–295.

6. Третьяков П.К., Прохоров А.Н. Сверхзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель с пульсирующим режимом запуска (СПВРД с ПРЗ) и способ его работы. Патент RU 2651016.
7. Третьяков П.К. Преддетонационный режим горения (к реализации в высокоскоростном ПВРД) // В сб.: Материалы XI Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016). Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 154–157.
8. 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, November 26–29, 2018): Proceedings. № 2018_2240912. S. 1, 2018. P. 1–10.
9. Tretyakov P.K., Krainev V.L., Lazarev A.M., Postnov A.V. Peculiarities of Organization of Effective Hydrocarbon Fuel Combustion in Supersonic Flow // XIX Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Res. (ICMAR2018, Novosibirsk, Russia, August 13–19, 2018): AIP Conf. Proc. V. 2027. № 1. S. 1. 2018. 030029(6) p.

INITIATION OF KEROSENE COMBUSTION IN SUPERSONIC AIR FLOW BY A PACKAGE OF GAS-DYNAMIC PULSES

P. K. Tretyakov

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.A. Levin May 17, 2019

Received April 25, 2019

A technique has been proposed and the possibility of its realization for the initiation of kerosene combustion in supersonic air flow in part of the combustion chamber (CC) of a constant cross section has been confirmed. The intense combustion regime is realized with the use of a package of pulses of variable energy and is preserved at a switch-off of the action after the combustion arrangement in the CC diverging part.

Keywords: supersonic flow, combustion initiation, combustion chamber, pulse-periodic effect, the package of gas-dynamic pulses, the completeness of combustion.