

УДК 536.46

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В ПСЕВДОСКАЧКЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ПОДАЧЕ ВОДОРОДА СО СТЕНКИ

В. Н. Зудов¹, А. В. Тупикин², В. М. Абашев³

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

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

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

Представлены результаты экспериментального исследования инициирования горения водорода в сверхзвуковом потоке при подаче со стенки канала. Получены данные о динамике развития возмущения от газодинамических импульсов и о переходе к режиму горения в псевдоскачке, когда подача топлива идет со стенок камеры сгорания, а не по оси потока. Выявлены особенности инициирования преддетонационного горения для такой схемы подачи водорода в сверхзвуковой поток. Показано, что установившиеся режимы преддетонационного горения немного различаются в зависимости от способа подачи топлива (по оси или с периферии потока), в то время как динамика распространения волновых структур от газодинамических импульсов практически идентична в обоих случаях.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, волновые структуры, горение в псевдоскачке, распределение давления.

DOI 10.15372/FGV2024.9449

EDN PCRONQ

Данная работа является продолжением исследований, направленных на изучение преддетонационного горения в каналах со сверхзвуковой скоростью потока на входе [1–7]. В [1] был предложен новый эффективный способ организации рабочего процесса в камерах сгорания (КС), в котором должно сохраняться сверхзвуковое либо трансзвуковое течение среды по всему тракту, т. е. на выходе КС число Маха всегда $M \geq 1$. В канале постоянного сечения горение осуществляется в волновых структурах (псевдоскачковое горение), а в расширяющейся части КС необходимо согласование степени расширения и энергоподвода за счет дополнительной подачи топлива. Основные принципы такого подхода и способ запуска КС сформулированы в патенте [2]. В работах [3–5] представлены результаты, свидетельствующие о реализации интенсивного горения керосина в псевдоскачке под действием газодинамических импульсов (ГИ). В таком режиме реализуется высокая полнота сгорания при малой протяженности зоны горения. При этом было показано, что интенсивное горение в секции постоянного сечения сохраняется при отключении воздействия воздушными импульсами после организации горения в расширяющейся части КС. Снизить интенсивность ГИ для выхода на рабочий режим можно за счет применения продуктов пиролиза керосина [5]. В работах [6, 7] определены предельные условия существования режимов горения в псевдоскачке. Согласно термодинамическим оценкам и результатам экспериментов горение в псевдоскачке возможно при минимальной температуре торможения $T^* = 1400$ К и скорости в части КС постоянного сечения, равной числу Маха на входе в канал $M_c = 1.7$ [6]. При этом необходимо, чтобы в канале имелось место

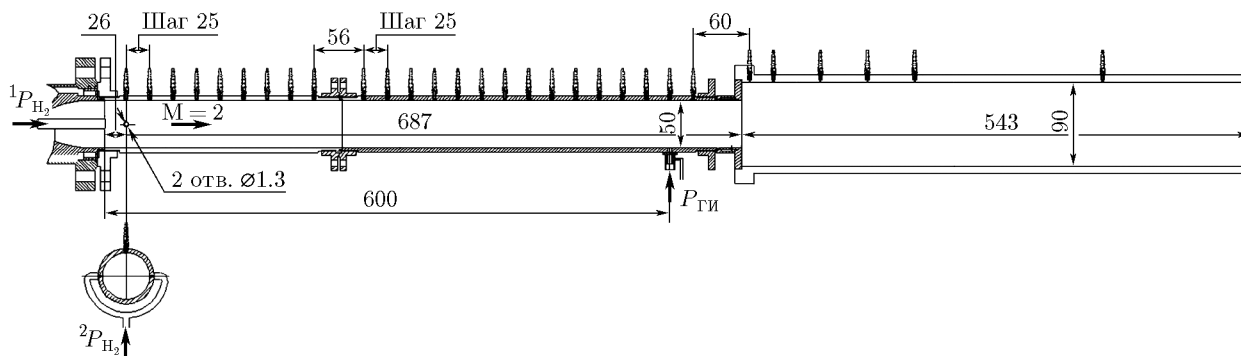


Рис. 1. Канал переменного сечения (модельная КС):

$^1P_{H_2}$ — подача водорода по оси; $^2P_{H_2}$ — подача водорода со стенки канала

с числом Маха, достаточно близким к числу Маха детонации Чепмена — Жуге, а расстояние до расширяющейся части превышало длину псевдоскачка [7]. Следует отметить, что во всех представленных выше исследованиях подача топлива в канале постоянного сечения выполнялась по оси потока. Для процессов, протекающих в псевдоскачке, это, возможно, не играет существенной роли, но для технических приложений лучше, если подача топлива будет осуществляться с боковой поверхности КС. В этом случае из конструкции исключаются пилоны и эжекторы, газодинамические возмущения от которых вносят вклад в потери полного давления по тракту двигателя.

В работе ставилась цель определить влияние способа подачи топлива в канале постоянного сечения на инициирование преддетонационного горения при импульсном газодинамическом воздействии на сверхзвуковой поток.

Опыты проводились в режиме присоединенного трубопровода на осесимметричном канале с секциями постоянного сечения и с внезапным расширением (модельная КС, рис. 1), входной диаметр 50 мм. На входе создавался сверхзвуковой поток с расчетным числом Маха $M_c = 2.2$, температурой торможения $T^* \approx 1650$ К и давлением в форкамере $P_0 \approx 0.7$ МПа. Водород подавался по оси ($^1P_{H_2}$) или с боковой стенки канала ($^2P_{H_2}$), при этом осевой инжектор не удалялся, сохраняя идентичность течений до подачи водорода. Коэффициент избытка воздуха был $\alpha = 11.5$, что при полноте сгорания $\Psi = 1$ соответствует условию торможения сверхзвукового потока до трансзвукового режима без теплового запираания течения. Без подачи водорода по распределению статического давления сделана интерполяция функции распределения числа Маха по длине канала постоянного сечения:

$M(x [\text{мм}]) \approx 2.35 - 0.12 \frac{x}{650}$. В качестве генератора ГИ применялся быстродействующий клапан с ресивером на входе, работающий в импульсно-периодическом режиме со спадающей амплитудой (частота $f = 45$ Гц и скважность $n = 2$). Интенсивности первых импульсов было достаточно для интенсификации горения и перехода к преддетонационному режиму горения. Длина первой секции модельной КС превышала протяженность псевдоскачка более чем в два раза. Приведем некоторые оценки предельных параметров для условий эксперимента: число Маха в начале псевдоскачка $M_{in} = 2.2$, показатель адиабаты $\gamma = 1.34$, $T^* = 1650$ К, теплоемкость при постоянном давлении $c_p \approx 0.27$ ккал/(кг·К), теплотворная способность $H_u = 33800$ ккал/кг, стехиометрический коэффициент $L_0 = 34.5$.

Максимальное значение коэффициента нерасчетности (тепловое запираание):

$$\eta_{max} = \frac{(1 + \gamma M_{in}^2)^2}{(\gamma + 1) M_{in}^2 [2 + (\gamma - 1) M_{in}^2]}. \quad (1)$$

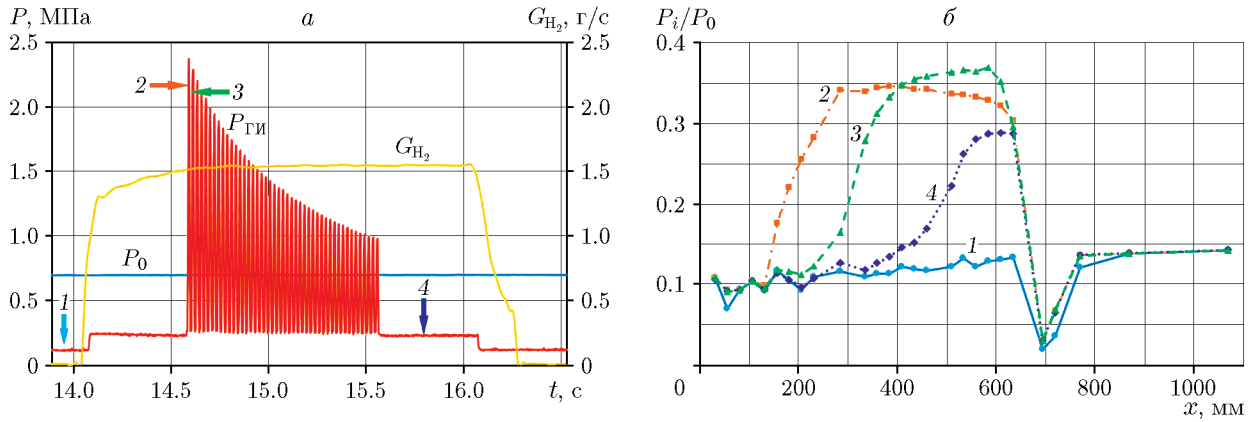


Рис. 2. Циклограмма (а) и распределение давления по длине канала (б) при осевой подаче водорода:

1 — до подачи водорода, 2 и 3 — крайние положения в течение газодинамического импульса, 4 — после отключения генератора газодинамических импульсов

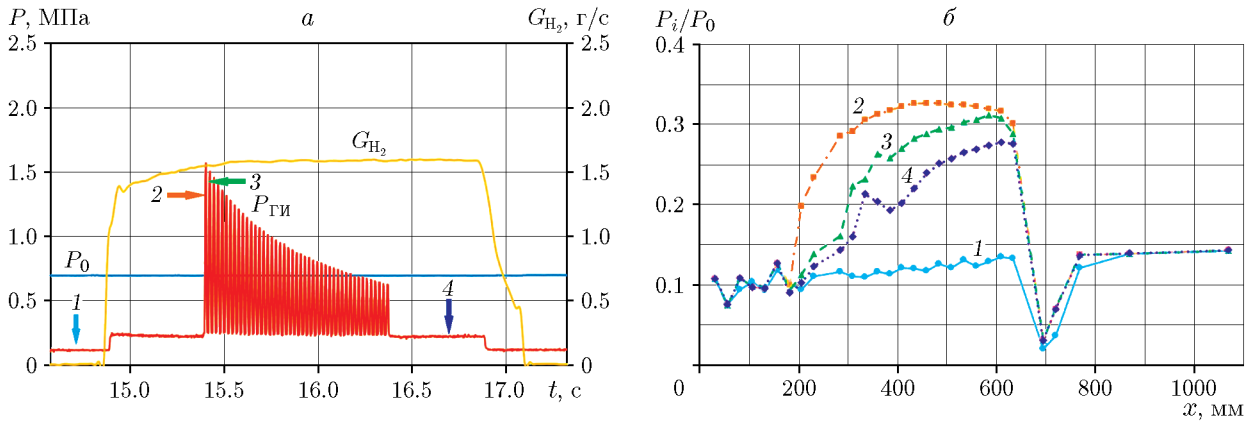


Рис. 3. Циклограмма пуска (а) и распределение статического давления по длине канала (б) при подаче водорода со стенки (1–4 — см. подпись к рис. 2)

Максимальный теплоподвод к потоку в этом случае:

$$\Delta Q_{max} = G_{H_2} \text{Nu} = G_{mix} c_p (\Delta T)_{max} = G_{mix} c_p \left[\frac{(1 + \gamma M_{in}^2)^2}{(\gamma + 1) M_{in}^2 [2 + (\gamma - 1) M_{in}^2]} - 1 \right] T^*, \quad (2)$$

где G_{H_2} — расход водорода, G_{mix} — общий расход топливно-воздушной смеси, $(\Delta T)_{max}$ — максимальный прирост температуры при теплоподводе.

Отсюда предельное значение коэффициента избытка воздуха:

$$1 + L_0 \alpha_{cr} = \frac{\text{Nu}}{c_p T^* \left\{ \left[\frac{(1 + \gamma M_{in}^2)^2}{(\gamma + 1) M_{in}^2 [2 + (\gamma - 1) M_{in}^2]} \right] - 1 \right\}}. \quad (3)$$

Подставляя исходные данные в (3), имеем следующие предельные параметры: коэффициент избытка воздуха $\alpha_{cr} \approx 7$, расход водорода $G_{H_2} \approx 2.5$ г/с.

На рис. 2 и 3 представлены циклограммы опытов (а) и распределения статического давления вдоль канала (б): до подачи водорода (1), крайние положения в течение газодинамического импульса (2, 3), после отключения генератора ГИ (4). Длина псевдоскачка

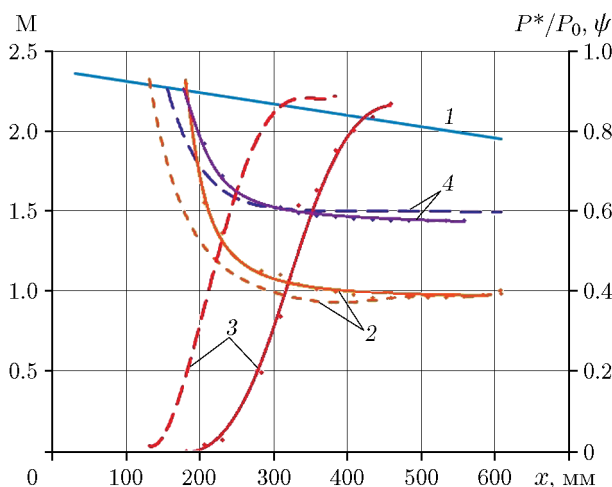


Рис. 4. Распределения чисел Маха без горения (1) и с горением (2), полноты сгорания (3) и потери полного давления (4):

штриховая линия — подача по оси, сплошная — подача со стенки

составляет порядка пяти калибров. Следует отметить, что при осевой подаче водорода газодинамическим импульсом псевдоскачок смещается вверх по потоку с интенсификацией горения, затем между импульсами следует снос по потоку и небольшое снижение теплоподвода от горения. Согласно оценкам, выполненным по модели, представленной в [8], для распределений 2 и 3 на рис. 2,б рост температуры при горении в псевдоскачке составляет $\Delta T = 285$ и 210 К соответственно. При подаче водорода со стенки канала газодинамические импульсы приводят к инициированию преддетонационного горения (распределение 2 на рис. 3,б) с ростом температуры в результате горения на $\Delta T = 290$ К, между импульсами псевдоскачок выходит из первой секции канала, оставляя только головную часть (распределение 3 на рис. 3,б). После отключения генератора ГИ наблюдается горение в конце первой секции и за расширением (распределение 4 на рис. 2,б и 3,б). Число Маха детонации Чепмена — Жуге для условий эксперимента ($M_c = 2.2$, $T^* \approx 1650$ К и $\alpha = 11.5$) будет $M_J = 1.9$ [9], поэтому в канале в отсутствие импульсов нет устойчивого положения псевдоскачка.

Для сравнения способов подачи применим модель теплоподвода в псевдоскачок, предложенную П. К. Третьяковым [8]. На рис. 4 приведены результаты оценок: распределение числа Маха по каналу без водорода (1) и при горении в псевдоскачке (2), полнота сгорания (3), определенная из теплоподвода, и отношение полного давления к давлению в форкамере (4). Как можно заметить, при любом способе подачи водорода (штриховая линия — подача по оси, сплошная — со стенки) в псевдоскачке идет переход к трансзвуковому течению $M \approx 0.95$, полнота сгорания $\Psi \approx 0.9$, отношение давлений $P^*/P_0 \approx 0.6$, различие наблюдается только в положении места подачи водорода в канале: при подаче со стенки псевдоскачок находится ниже по потоку. Одной из характеристик теплоподвода

в псевдоскачок является эффективное число Маха: $M_{eff} = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left(\frac{P_{fin}}{P_{in}} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)}$, где P_{in}

и P_{fin} — давление в начале и в конце псевдоскачка. Для разных способов подачи водорода это число изменяется от $M_{eff} = 1.78$ до $M_{eff} = 1.73$ (приосевая и со стенки соответственно). Периферийная подача водорода немного эффективнее, но при этом псевдоскачок реализуется ниже по потоку, чем в случае подачи по оси канала.

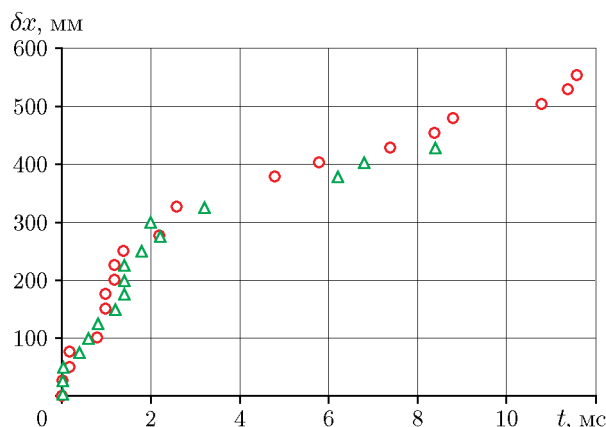


Рис. 5. Динамика распространения волновых структур от газодинамического импульса: кружки — осевая подача водорода, треугольники — с боковой поверхности канала

На рис. 5 представлена динамика распространения волновых структур от газодинамического импульса (δx — смещение волновых структур навстречу потоку). На графике можно выделить две области: «быстрое» смещение ($u_w = 150$ м/с — средняя скорость относительно стенки канала) в продуктах сгорания (до 300 мм от точки подачи ГИ) и «медленное» смещение ($u_w = 25$ м/с) вверх по потоку головных структур псевдоскачка. Динамика распространения волновых структур от газодинамических импульсов практически идентична в обоих случаях подачи водорода.

Таким образом, реализован режим преддетонационного горения водорода в канале постоянного сечения при подаче со стенки. Показано, что установившиеся режимы преддетонационного горения немного отличаются в зависимости от способа подачи топлива (по оси или с периферии потока). Периферийная подача водорода оказалась немного эффективнее, но псевдоскачок реализуется ниже по потоку, чем в случае подачи по оси канала. При этом динамика распространения волновых структур от газодинамических импульсов практически идентична в обоих случаях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики СО РАН (номер госзадания 124021400036-7) и Института теплофизики СО РАН (номер госзадания 122041400020-6).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Третьяков П. К.** Организация пульсирующего режима горения в высокоскоростных ПВРД // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 21–27. — EDN: PVONAB.
2. **Пат. РФ 2651016.** Сверхзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель с пульсирующим режимом запуска (СПВРД с ПРЗ) и способ его работы // П. К. Третьяков, А. Н. Прохоров. — Заявл. 08.04.2016; опубл. 18.04.2018.
3. **Третьяков П. К.** Инициирование горения керосина в сверхзвуковом потоке воздуха пакетом газодинамических импульсов // Докл. АН. — 2019. — Т. 489, № 3. — С. 250–253. — DOI: 10.31857/S0869-56524893250-253. — EDN: JZLBTW.
4. **Третьяков П. К.** Организация эффективного горения керосина в канале при больших скоростях потока // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 1. — С. 42–47. — DOI: 10.15372/FGV20200104. — EDN: QPIEYE.

5. Третьяков П. К., Тупикин А. В., Куранов А. Л., Колосенок С. В., Саваровский А. А., Абашев В. М. Применение синтез-газа для интенсификации горения керосина в сверхзвуковом потоке // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 45–48. — DOI: 10.15372/FGV20200504. — EDN: ZDUHYN.
6. Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н. Горение керосина в псевдоскачке при изменении условий на входе в модель камеры сгорания СПВРД // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 6. — С. 3–7. — DOI: 10.15372/FGV20210601. — EDN: BMAHED.
7. Третьяков П. К., Тупикин А. В. Режимы горения керосина в канале постоянного сечения при числе Маха на входе $M = 1.7$ // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 28–32. — DOI: 10.15372/FGV20220504. — EDN: HDNTVN.
8. Третьяков П. К. Определение теплоподвода к потоку в канале с псевдоскачком // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 3. — С. 71–77. — DOI: 10.15372/FGV20200104. — EDN: QPIEYE.
9. Бартльме Ф. Газодинамика горения. — М.: Энергоиздат, 1981.

Поступила в редакцию 29.01.2024.

После доработки 18.03.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.
