

УДК 536.46

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В КАНАЛЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ЧИСЛЕ МАХА НА ВХОДЕ $M = 1.7$

П. К. Третьяков¹, А. В. Тупикин²

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, tupikin@itp.nsc.ru

Представлены результаты изучения горения керосина в каналах постоянного сечения при числе Маха на входе $M = 1.7$. Эксперименты проводились в каналах с отличающейся геометрией проточной части. Показано существование режимов течения с волновыми структурами, не приводящими к развитию псевдоскачкового режима горения. Определены критические условия, выполнение которых необходимо для инициирования и реализации преддетонационного квазистационарного режима горения.

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

DOI 10.15372/FGV20220504

Выполненное исследование является продолжением экспериментального изучения режимов горения в камере сгорания (КС) при параметрах потока, соответствующих числу Маха на входе в двигатель (СПВРД) $M_0 \approx 4.5$. В [1] опубликованы термодинамические оценки и результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность реализации перехода к сверхзвуковой скорости в части КС постоянного сечения с числом Маха $M_c = 1.7$ при температуре торможения $T^* = 1400$ К и с организацией горения керосина в псевдоскачке.

В работе представлены результаты изучения горения в волновых структурах (типа псевдоскачка) в канале постоянного сечения. Особое внимание уделено определению критических условий, при которых происходят иницирование и интенсификация горения, поддержание преддетонационного режима путем газодинамического воздействия импульсами воздуха либо теплоподводом в расширяющуюся часть модельной КС.

Опыты проводились в режиме присоединенного трубопровода в вариантах модельной КС (рис. 1): в двух случаях это были каналы постоянного сечения (КС-I и КС-II), остальные три — с внезапным расширением, отличающиеся длиной первой секции (КС-III, КС-IV и КС-V). На входе модельных КС создавался сверхзвуковой поток с расчетным числом Ма-

ха $M = 1.7$, температурой торможения $T^* \approx 1400$ К и полным давлением $p^* \approx 0.5$ МПа. Керосин подавался по оси КС, коэффициент избытка воздуха по керосину $\alpha_{\text{кер}} = 11.5 \div 12$. Соблюдалось условие, чтобы при полном сгорании керосина теплоподвод не приводил к тепловому заклиниванию течения в канале, а торможение потока проходило до значения числа Маха, близкого к $M = 1$. При этом максимальная скорость движения псевдоскачка с горением, определяемая детонацией Чепмена — Жуге [1, 2] для условий эксперимента, будет $u_J = 1000$ м/с ($M_J = 1.67$). В качестве генератора газодинамических импульсов (ГТИ) применялся быстродействующий клапан с ресивером на входе. Использовались два режима работы ГТИ: одиночный импульс (длительность 0.5 с) и импульсно-периодический со спадающей амплитудой частотой $f = 45$ Гц и скважностью $n = 2$.

На рис. 2,а представлено распределение статического давления p_i вдоль модельной КС-I, отнесенного к давлению в форкамере установки p_0 . Точки 1 соответствуют режиму без импульса в двух пусках (с керосином и без), 2 и 3 показывают воздействие импульса на течение в канале (осредненные данные за 20 мс от начала импульса). Имеется небольшое отличие в динамике движения волновых структур по каналу, но интенсивный режим горения не наблюдался. Кривая 2 представляет характерное распределение давления в псевдоскачке, его длина составляет примерно $l_{ps} \approx 200$ мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-08-00245).

© Третьяков П. К., Тупикин А. В., 2022.

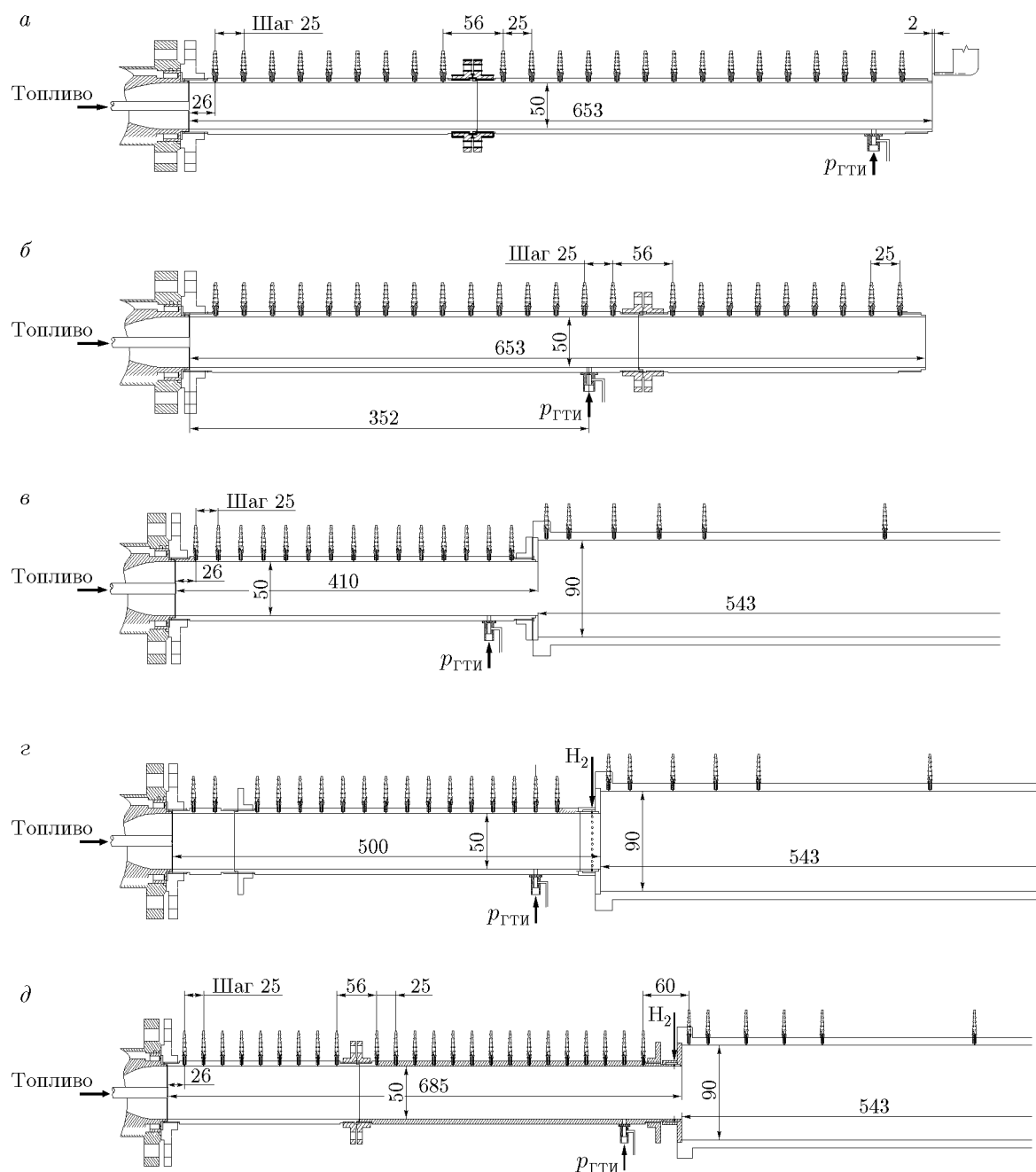


Рис. 1. Схемы модельных камер сгорания:
 а — КС-I, б — КС-II, в — КС-III, г — КС-IV, д — КС-V

Из рис. 2, а следует, что при наличии псевдоскачка в топливно-воздушном потоке тепловыделение от горения в волновых структурах не происходит. Смещение места подачи импульсов ГТИ в середину канала (см. рис. 1, КС-II) позволяет инициировать горение с помощью серии импульсов. На рис. 2, б распределению давления невозмущенного течения (режимы с ке-

росином и без) соответствует кривая 1, а при воздействии импульсами ГТИ (без керосина) — кривая 2. Реализуется режим горения только со стабилизацией на инжекторе (кривая 3 на рис. 2, б) и дозвуковым потоком до места подачи импульсов ГТИ. Отключение ГТИ ведет к срыву горения. То есть на выходе канала требуется создать условия, которые воспрепятствуют

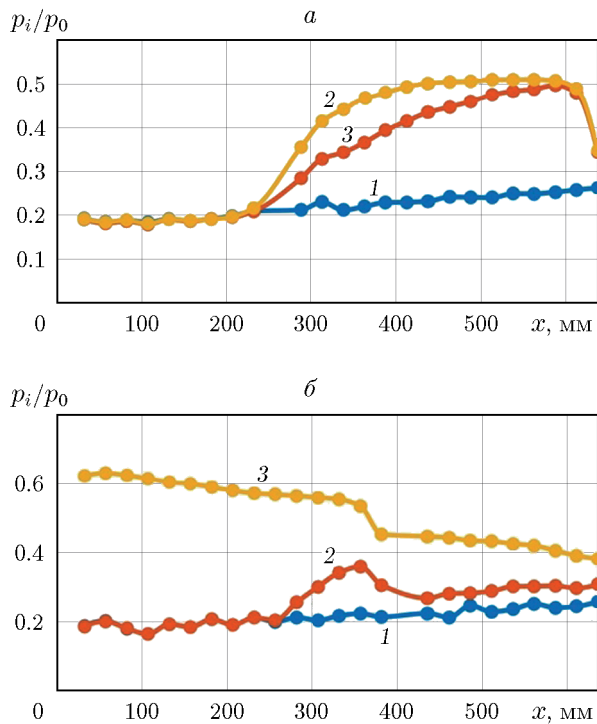


Рис. 2. Распределение давления по длине канала:

a — для одиночного импульса в КС-I: 1 — без ГТИ, 2 — с ГТИ, без керосина, 3 — с ГТИ и керосином; *б* — для импульсно-периодического режима в КС-II: 1 — без ГТИ, 2 — с ГТИ, без керосина, 3 — с ГТИ, стабилизация на инжекторе

разрушению волновых структур при отключении ГТИ. Для этого конфигурация модельной КС была преобразована в канал с внезапным расширением (см. рис. 1, модели КС-III, КС-IV и КС-V) и оснащена поясом подачи водорода перед расширяющейся частью.

В короткой секции постоянного сечения ($L = 410$ мм, КС-III) реализовывались режимы (рис. 3), аналогичные полученным в каналах постоянного сечения КС-I и КС-II: стабилизация на инжекторе (кривая 2 на рис. 3,б) и срыв пламени с восстановлением структуры течения без ГТИ. Подача водорода перед расширением не стабилизирует пламя внутри канала постоянного сечения. Срыв мог происходить при наличии водорода и работающем ГТИ (кривая 3 на рис. 3,б). Если предположить, что после срыва пламени с инжектора горение в волновых структурах продолжается, то время восстановления течения будет определяться длиной канала L и разницей скоростей потока u_0 и псевдоскачка относительно неподвижной среды u_{ps} : $\Delta t = L/(u_0 - u_{ps})$. На-

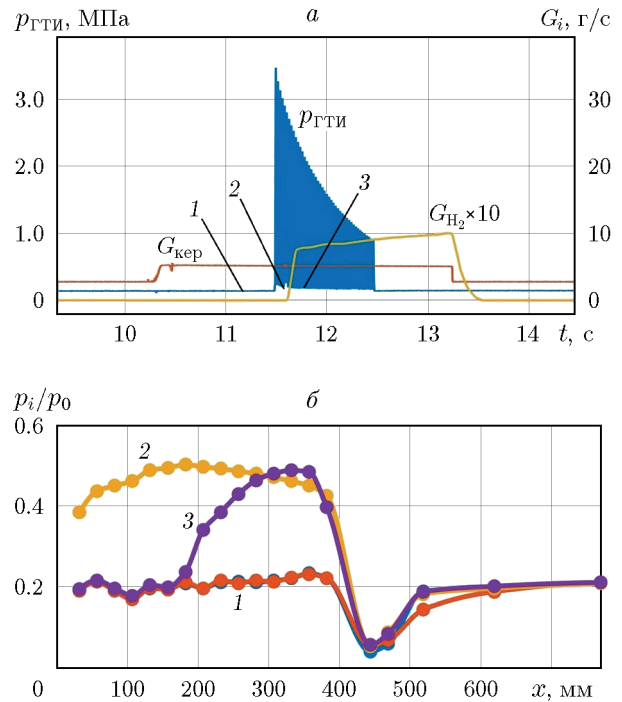


Рис. 3. Циклограмма пуска (*a*) и распределение статического давления по длине КС-III (*б*):

$p_{ГТИ}$ — давление в ГТИ, $G_{кер}$ — расход керосина, $G_{H_2} \times 10$ — расход водорода, 1 — без ГТИ, 2 — инициирование горения, 3 — срыв пламени с инжектора (в соответствии с отмеченными на циклограмме моментами времени)

чальная скорость потока $v_0 = 1020$ м/с, а скорость псевдоскачка относительно неподвижной среды лимитируется детонационной скоростью Чепмена — Жуге $u_{ps} < u_J$, тогда время восстановления течения после срыва пламени с инжектора будет $\Delta t \approx 20$ мс. На рис. 4 представлена динамика срыва пламени с инжектора (движение пламени вдоль канала). По оси абсцисс отложено время восстановления потока в заданном месте канала до невозмущенного состояния от момента срыва пламени с инжектора, который определялся по показаниям на первом от среза сопла датчике давления. Согласно данным рис. 4 $\Delta t \approx 18 \div 20$ мс в канале длиной $L = 410$ мм. Отметим, что полученное значение немного меньше периода импульсов ГТИ ($\tau_{и} = 1/f \approx 22$ мс). Кроме того, для стабилизации преддетонационного горения необходимо, чтобы в канале имелось место, где число Маха равнялось бы или было достаточно близким к числу Маха детонации Чепмена — Жуге, $M(x_J) = M_J$. По распреде-

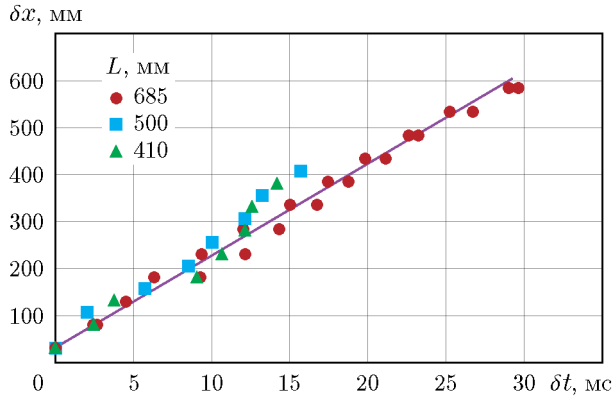


Рис. 4. Динамика срыва пламени:

δx — положение датчика давления, δt — временной интервал между восстановлением на первом и текущем датчиках давления (прямая линия определяет среднюю скорость движения пламени относительно стенки КС при срыве горения)

лению давления невозмущенного течения (точки 1 на рис. 3) можно восстановить распределение числа Маха по длине канала постоянного сечения КС-III [4], при этом число Маха зависит практически линейно от расстояния до среза сопла: $M(x) = 1.75 - 0.09x/410$ (здесь и везде далее размерность x — мм). Наличие керосинового инжектора приводит к некоторому отличию числа Маха на входе модельной КС от расчетного значения для профиля сопла $M = 1.7$. На расстоянии $x_J = 344$ мм число Маха будет равно детонационному $M(x_J) = M_J$, при этом расстояние от этой точки до расширяющейся части будет меньше длины псевдоскачка, $L - x_J < l_{ps}$, т. е. псевдоскачок перемещается из канала постоянного сечения в расширяющуюся часть. Таким образом, исходя из временных и геометрических соотношений в эксперименте в модельной КС-III не может быть реализован режим преддетонационного горения.

После удлинения канала постоянного сечения до $L = 500$ мм время восстановления течения после срыва пламени с инжектора увеличилось до $\Delta t \approx 24$ мс (см. рис. 4) и немного превысило период импульсов ГТИ. Распределение числа Маха вдоль КС $M(x) = 1.74 - 0.12x/500$ и условие равенства чисел Маха ($M(x_J) = M_J$) достигались на расстоянии $x_J = 292$ мм. Хотя расстояние от места возможной стабилизации пламени до расширяющейся части примерно равно длине псевдоскачка $L - x_J \approx l_{ps}$, устойчивого преддетонационного горения зарегистрировать не удалось. Наблюдались режи-

мы, в которых срыв пламени с инжектора не приводил к прекращению горения, а происходило возвращение пламени на инжектор при следующем импульсе.

В модели КС-V длина канала постоянного сечения равнялась $L = 685$ мм, в этом случае $M(x) = 1.75 - 0.21x/685$, $x_J = 261$ мм и $L - x_J > l_{ps}$. В данном варианте КС были реализованы все режимы горения: стабилизация на инжекторе, срыв с инжектора, переходящий в пульсирующий режим горения в псевдоскачке, и квазистационарный преддетонационный режим, поддерживаемый горением водорода в расширяющейся части КС (см. также [2]). Отметим, что перечисленные режимы не наблюдаются в единичном эксперименте, но реализуемы при варьировании расходов водорода и керосина и изменении времен начала подачи водорода и включения ГТИ относительно друг друга. На рис. 5, б представлены распределения давления по длине КС в некоторых из вышеупомянутых режимах, полученных в одном опыте: сверхзвуковое течение без возмущений

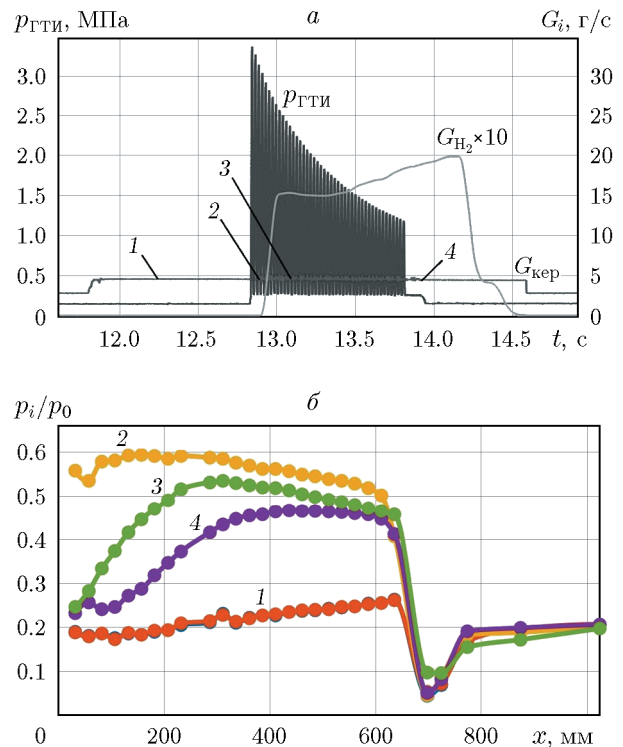


Рис. 5. Циклограмма пуска (а) и распределение давления по длине канала КС-V (б):

1 — без ГТИ, 2 — инициирование горения, 3 — срыв с инжектора при наличии водорода, 4 — срыв горения

(1), инициирование горения (2), срыв с инжектора (3) и срыв пламени (4). В ходе экспериментов варьировалось давление в форкамере от $p_0 = 0.45$ до 0.55 МПа, при этом сохранялся преддетонационный режим горения, поддерживаемый теплоподводом в расширяющейся части КС.

Таким образом, проведенные исследования показали:

– не всегда при наличии псевдоскачка в топливно-воздушном потоке может происходить тепловыделение от горения в волновых структурах. В модельных КС без внезапного расширения не удалось инициировать псевдоскачковый режим горения, несмотря на поддержание газодинамическими импульсами волновых структур;

– в моделях КС с внезапным расширением возможна реализация псевдоскачкового горения, поддерживаемого газодинамическими импульсами, если время восстановления потока меньше периода импульсов. При этом необходимо, чтобы в канале имелось место, в котором число Маха равнялось бы или было достаточно близким к числу Маха детонации Чепмена — Жуге, а расстояние до расширяющейся части превышало длину псевдоскачка;

– для поддержания устойчивого горения в псевдоскачке требуется организация горения в расширяющейся части. Режим псевдоскачкового горения был реализован в секции постоянного сечения модельной КС-V при температуре торможения $T^* = 1400$ К, полном давлении $p^* \approx 0.5$ МПа и числе Маха на входе КС $M = 1.7$. При этом варьирование давления в форкамере от $p_0 = 0.45$ МПа до $p_0 = 0.55$ МПа не влияло значительно на режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Бартльме Ф.** Газодинамика горения. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976. — Ч. 1.

*Поступила в редакцию 02.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.*