

ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

В. А. Забайкин, А. А. Смоголев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
lab2@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования горения водорода в сверхзвуковом высокочастотном воздушном потоке в осесимметричных каналах постоянного и переменного сечения. Исследованы условия перестройки течения при организации теплоподвода в каналах различной геометрии. Показано, что при газодинамическом воздействии достигается устойчивое самовоспламенение и появляется возможность управления горением в расширяющихся каналах специального профиля.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, горение водорода, геометрия каналов.

Анализ исследований, связанных с организацией горения в канале при сверхзвуковой скорости потока на входе, позволяет выделить ряд проблем, без решения которых невозможно обеспечить надежную работу двигателя гиперзвукового летательного аппарата. В первую очередь к ним следует отнести непредсказуемость реализации того или иного режима горения в диапазоне параметров полета, соответствующих числам Маха $M = 5 \div 8$. Речь идет о режимах диффузионного и «псевдоскачкового» горения, а также о проблеме теплового запыления, что становится особенно актуальным при необходимости организации эффективного теплоподвода в этих условиях [1–7]. На переход к тому или иному режиму оказывают значительное влияние конфигурация канала и способ инициирования горения. В гладких, особенно в расширяющихся, каналах существуют также трудности с надежной стабилизацией пламени и достижением приемлемой полноты сгорания. Применяющиеся классические устройства для стабилизации пламени, создающие отрывы потока и зоны рециркуляции (клинья, уступы, пилоны и т. п.), как правило, увеличивают загромождение канала и находятся под воздействием высокотемпературных потоков. Это повышает требования к системам теплозащиты, которые, в свою очередь, значительно увеличивают вес и габариты двигателя. Существенным фактором является также возрастание потерь полного давления, ведущее, особенно при вы-

соких температурах потока, к ухудшению баланса между тягой, создаваемой за счет химических реакций, и внутренними потерями по тракту двигателя. Поэтому важно развивать газодинамические [8–10] и кинетические [11–14] способы управления горением, являющиеся особенно перспективными при переходе к высоким температурам, характерным для скоростей полета, соответствующих числам Маха $M \geq 8 \div 10$.

Целью данного экспериментального исследования было определение влияния геометрии канала и начальных параметров воздушного потока на стабилизацию пламени и интенсивность горения при спутной подаче водорода.

Исследования проводились на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха [15]. Каналы присоединялись к осесимметричному соплу, рассчитанному на число Маха $M = 2.2$ с диаметром на выходе 50 мм. В экспериментах температура торможения составляла $T_0 = 1500 \div 2700$ К, давление торможения $p_0 = 5 \div 8.5 \cdot 10^5$ Па, расход воздуха $0.5 \div 1$ кг/с. Водород подавался спутно из инжектора ($M = 2.7$, расход $1.9 \div 11$ г/с, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.4 \div 10$), установленного по оси сопла. В отличие от работы [8], где использовалось сопло с числом Маха $M = 1.4$, что обеспечивало истечение с недорасширением, в данной работе воздушная струя на выходе из сопла (а также из канала) в затопленное пространство была перерасширенной; степень нерасчетности $n \approx 0.6 \div 0.7$.

Канал постоянного сечения (диаметром

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00735).

50 мм) набирался из отдельных секций длиной 100, 150 и 200 мм. Общая длина канала 450 мм.

После включения плазмотрона в горячем воздушном потоке происходило самовоспламенение водорода, однако процесс запуска имел свои особенности, которые существенно влияли на процесс горения в канале. В начальный момент времени всегда происходил значительный рост температуры (до уровня выше $3\,000 \div 4\,000$ К), что, как правило, приводит к немедленному «запиранию» канала до выхода на экспериментальный режим. Поэтому была применена специальная схема запуска, при которой в топливный инжектор сначала подавался воздух (необходимый для охлаждения инжектора), а после выхода на режим происходило переключение на подачу водорода. В этом случае воспламенение и последующее горение водорода определялись только параметрами течения на заданном режиме.

В канале длиной 450 мм при температуре торможения воздуха ниже 2000 К интенсивное горение водорода наблюдалось только на выходе из канала. При этом пламя имело форму, характерную для факела в затопленном пространстве (рис. 1, *a*). Видимое отличие состояло лишь в большей площади поперечного сечения пламени в месте воспламенения (вследствие предварительного перемешивания водорода и воздуха в канале), а регистрация излучения ОН показала отсутствие характерной «бочкообразной» структуры внутри зоны горения

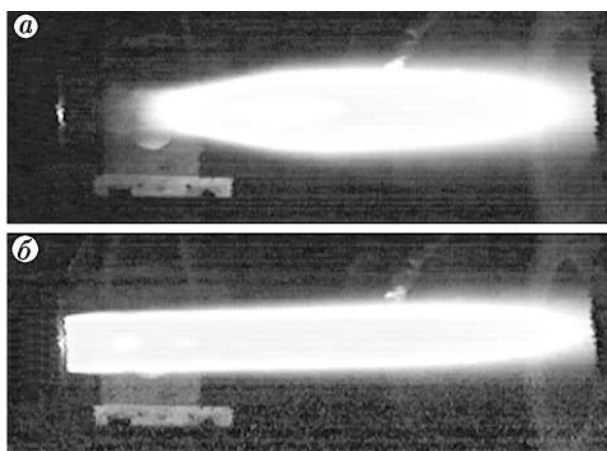


Рис. 1. Фотографии пламени в видимой области за цилиндрическим каналом:

a — горение за каналом, *б* — дозвуковое горение по всей длине канала (режим запирания)

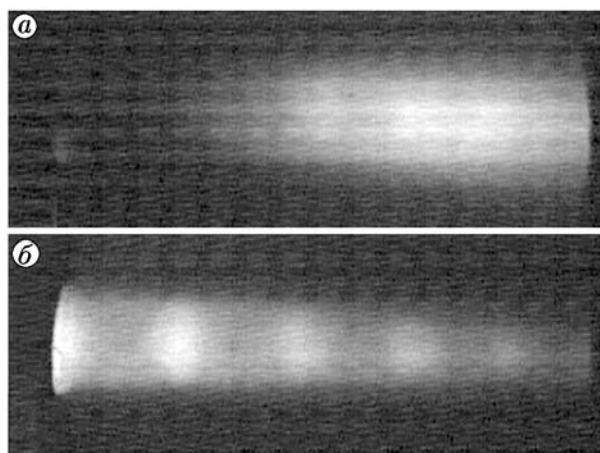


Рис. 2. Излучение радикала ОН в ультрафиолетовой области спектра:

обозначения *a* и *б* соответствуют рис. 1, поток слева направо

ния (рис. 2, *a*). Из оценок следует, что к концу канала при отсутствии горения скорость потока снижается до соответствующего значения $M \approx 1.7$, а так как воспламенение начиналось на некотором расстоянии от выхода из канала, то горение происходит уже при трансзвуковом течении.

Для реализации горения внутри канала непосредственно во время эксперимента повышали температуру торможения. В этом случае происходил «проскок» пламени в канал и осуществлялся переход к дозвуковому горению по всему тракту («запирание» канала). При этом, как и в последующих экспериментах, передачи возмущений в форкамеру не наблюдалось; по видимому, в сверхзвуковой части воздушного сопла образовывалась сложная газодинамическая структура, в которой и происходил переход к дозвуковому течению. Рис. 2, *б* позволяет предположить, что только на выходе из канала поток может разогнаться до сверхзвуковых скоростей. На рис. 1, *б* приведена фотография пламени на выходе из канала в данном режиме; на рис. 3 (поз. 1 и 2) представлено распределение статического давления по длине. Начало координат по оси *X* соответствует срезу сопла. Устойчивого промежуточного, в том числе псевдоскачкового, режима горения в канале данной длины не наблюдалось. Переход от одного режима к другому происходил за время менее 1 с. Различие температур торможения между режимами *a* и *б* составляет около 100° .

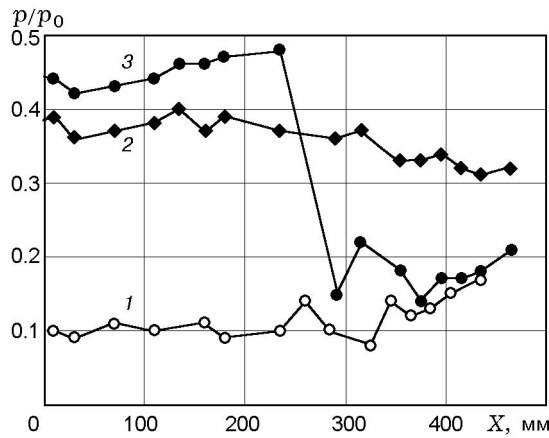


Рис. 3. Распределение статического давления по длине цилиндрического канала при различных режимах горения:

1, 2 — гладкий канал; 3 — канал с клином; $p_0 = 6 \cdot 10^5$ Па, $\alpha = 3.2$; 1 — $T_0 = 1950$ К, 2 — $T_0 = 2050$ К, 3 — $T_0 = 1900$ К

Обратное понижение температуры, а также изменение давления воздуха и расхода водорода не приводили к восстановлению сверхзвукового режима течения внутри канала.

Таким образом, в цилиндрическом канале при заданных параметрах потока устойчивый режим горения с участками сверхзвукового течения не реализовывался. Получены два режима — отсутствие горения в канале или тепловое заклинивание. В следующей серии экспериментов исследовались другие способы управления течением. Для этого между второй и третьей секциями (на расстоянии 250 мм от сопла) была введена короткая секция, позволявшая устанавливать различные стабилизаторы или производить вдув воздуха (рис. 4). Эксперименты показали, что единственным способом, которым в осесимметричном канале постоянного сечения удалось частично воздействовать на перестройку режима с тепловым заклиниванием, была установка между секциями клина с углом 19° и уступом высотой 3.5 мм (рис. 4, б). Фактически такой клин, несмотря на малые размеры, действовал как сверхзвуковое сопло и обеспечивал переход потока в сверхзвуковой режим ниже по потоку (см. рис. 3, поз. 3).

В случае установки секции с нишей длиной и глубиной 5 мм (см. рис. 4, а) и выдувом из нее небольшого количества воздуха заметного воздействия на горение не наблюдалось: распределение давления по длине канала оставалось практически таким же, как и в глад-

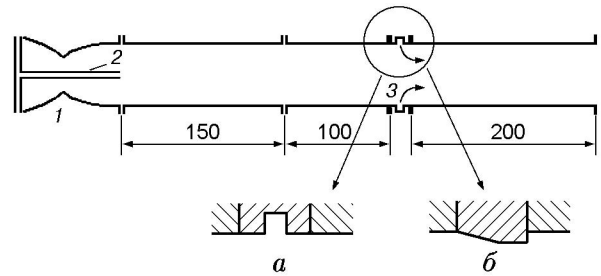


Рис. 4. Схема цилиндрического канала:

а — канал со вставкой, образующей нишу, б — канал с клином; 1 — воздушное сопло, 2 — водородный инжектор, 3 — вдув воздуха из ниши

ком канале без стабилизаторов (рис. 5, поз. 3). Устойчивое горение в псевдоскачке было реализовано только в случае стабилизации на нише без выдува воздуха. Кроме того, потребовалось снизить теплоподвод, для чего расход водорода был уменьшен до $\alpha \approx 9$. Зафиксированное распределение статического давления по длине канала представлено на рис. 5 (поз. 2).

Организация горения в псевдоскачке по сравнению с диффузионным горением позволяет существенно сократить длину камеры сгорания при одинаковом теплоподводе [16], однако управление псевдоскачковым режимом горения в гладком канале постоянного сечения очень сложное, так как промежуточные положения между тепловым заклиниванием и ре-

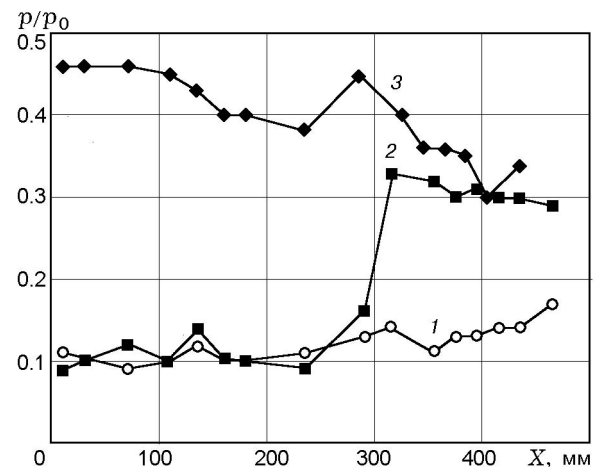


Рис. 5. Распределение статического давления по длине цилиндрического канала с нишей:

1 — статическое давление без горения, $T_0 = 300$ К; 2 — $T_0 = 1900$ К, $\alpha = 9$; 3 — горение + вдув воздуха из ниши, $T_0 = 2100$ К