

# ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В КАНАЛАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

В.А.Забайкин

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

## CHANGE OF HYDROGEN BURNING MODES IN CHANNELS AT SHORT-TERM INFLUENCE ON THE AIR STREAM

V.A.Zabaykin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

*Burning process in an air stream at speeds on a combustion chamber input in a range of Mach numbers  $M=1,5\div 3$  can be realized by two modes, which have different intensity of a thermal emission – in the form of a diffusive flame and in gasdynamic structure of pseudo-jump type. In the present work, it is shown that reorganization of a burning mode from diffusive to pseudo-jump one can be made by short-term power influence on a supersonic air stream.*

### Введение

Процесс горения в воздушном потоке при умеренных сверхзвуковых скоростях на входе в камеру сгорания ( $M=1,5\div 3$ ) может реализовываться двумя режимами, отличающимися интенсивностью тепловыделения – в виде диффузионного пламени и в газодинамической структуре типа псевдоскачка [1]. В работе показано, что перестройка режима горения от диффузионного к псевдоскачковому может производиться кратковременным энергетическим воздействием на сверхзвуковой воздушный поток. Применённые методы включали в себя дросселирование потока, импульсно-периодический ввод плазмы, детонационное воздействие, а также кинетическое (впрыск в топливо или поток небольшого количества промотора). В экспериментах фиксировалась интенсивность излучения водородного пламени в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн и регистрировалось распределение статического давления по длине канала. Показано, что от частоты и энергии воздействия зависит изменение интенсивности протекания процесса горения – от небольшого усиления диффузионного пламени до перехода к горению в псевдоскачке. На основе экспериментальных данных получены значения необходимой мощности импульсов для изменения режима горения.

### Схема экспериментов и полученные результаты

Эксперименты проводились на стенде сверхзвукового горения [2], с истечением горячего воздуха как в осесимметричный канал (рис. 1), так и в затопленное пространство. Подогрев воздуха осуществлялся электродуговым подогревателем до температур 1500-2000 К, достаточных для самовоспламенения водорода.

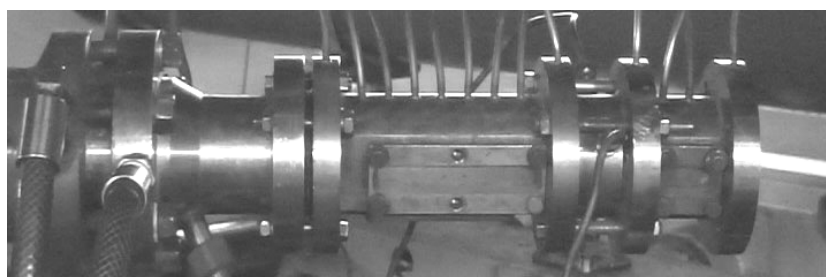


Рис. 1. Секции осесимметричного канала диаметром 50 мм.

Воздушный поток формировался при истечении из профилированного сопла с  $M = 2,2$ . По оси сопла устанавливался инжектор для подачи водорода. В форкамеру (перед соплом) могли подаваться промотирующие добавки – рис. 2.

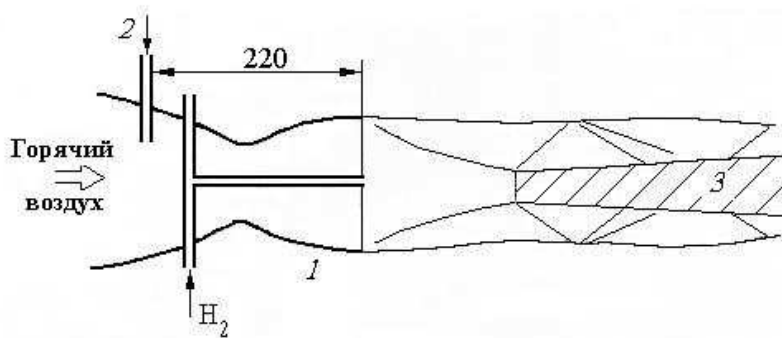


Рис. 2. Схема эксперимента по воздействию на пламя при истечении в затопленное пространство. 1 – воздушное сопло, 2 – место ввода промотирующих добавок, 3 – пламя, стабилизирующееся на газодинамических структурах.

В качестве добавок применялись перекись водорода, а также чистый водород. Режим без добавок выбирался таким образом, чтобы наблюдалась заметная задержка воспламенения. При подаче добавок в форкамеру задержка воспламенения сразу уменьшалась до нуля и пламя начиналось от инжектора во все время подачи примесей. На рис. 3 показан вид водородо-воздушного пламени после осевого инжектора в открытой струе при включении и выключении дополнительной подачи  $H_2$  в форкамеру.

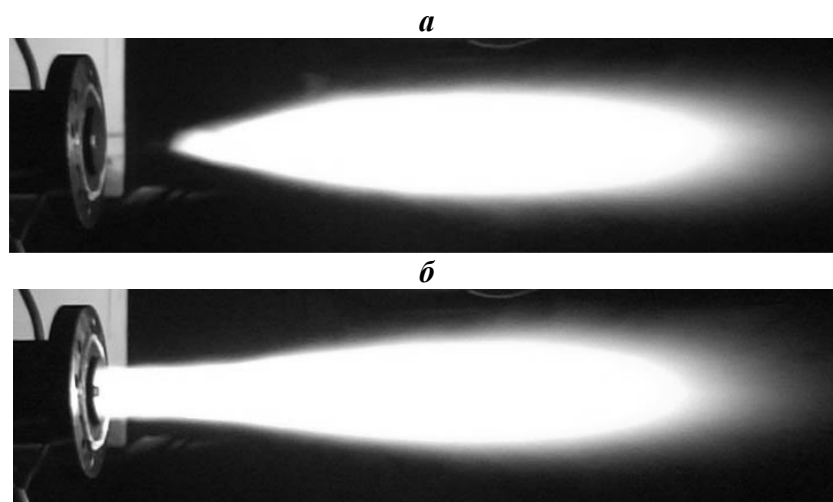


Рис. 3. Вид водородного пламени в сверхзвуковой воздушной струе. *a* – подача водорода только в осевой инжектор ( $G = 3$  г/с); *б* – подача  $H_2$  в инжектор ( $G = 3$  г/с) и форкамеру ( $G = 1$  г/с).

Таким образом, используя малый объем химически активных добавок (5-25% от расхода  $H_2$  через инжектор), возможно резко сократить период задержки воспламенения, улучшить устойчивость факела и в итоге изменить характер выгорания. Влияние химически активных добавок можно использовать и для простого управления факелом, так как даже минимальное количество водорода (0,1 г/с) уменьшает задержку воспламенения основного топлива (но наиболее эффективное воздействие происходит при расхода водорода  $G \geq 0,4$  г/с, что эквивалентно мощности 50 кВт). В комбинированном канале (состоящем из секций постоянного сечения и последующего расширения с углом 5 градусов) кратковременная подача дополнительного водорода в форкамеру позволяла менять режим горения с диффузионного на более интенсивный псевдоскачковый (рис. 4); при этом длительная подача промотора (свыше 1 с) приводила к тепловому запираанию.

Дополнительный водород мог подаваться также со стенки через специальную инжекторную секцию (рис. 1). Кратковременная подача в неё водорода позволяла менять режим горения, а при начальном горении за каналом (рис. 5) – способствовала переносу пламени внутрь канала. Такое кинетическое воздействие на пламя происходило за время менее 0,1 с.

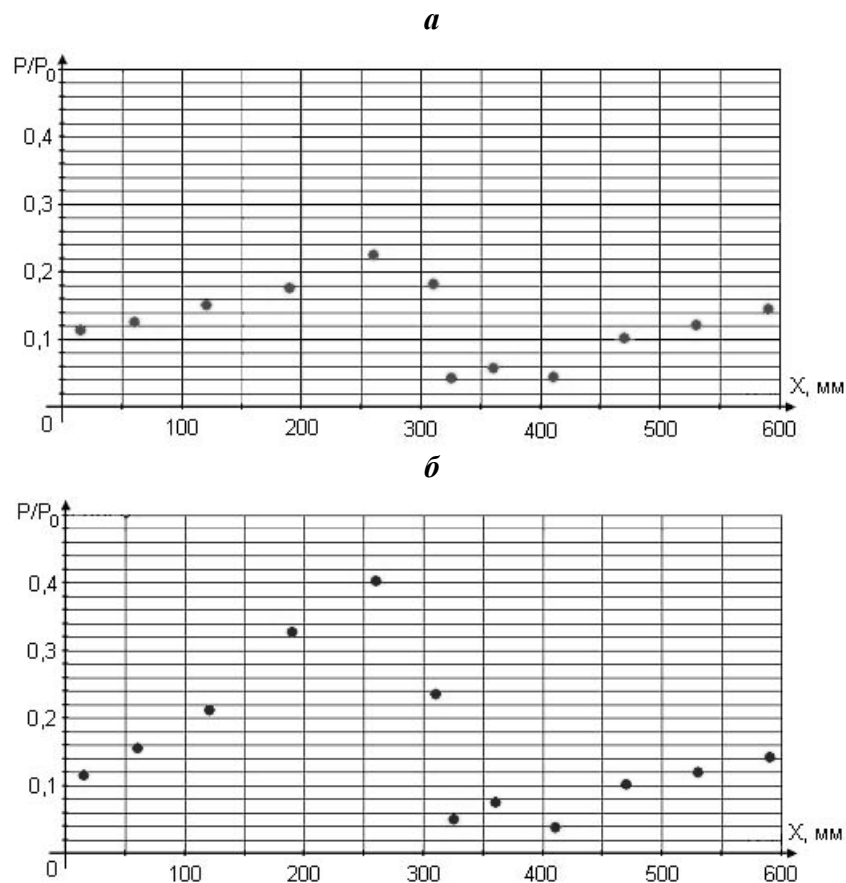


Рис. 4. Распределение статического давления по длине канала при диффузионном режиме горения (отсутствие дополнительного воздействия – *а*) и при псевдоскачковом (подача промотора в форкамеру – *б*).

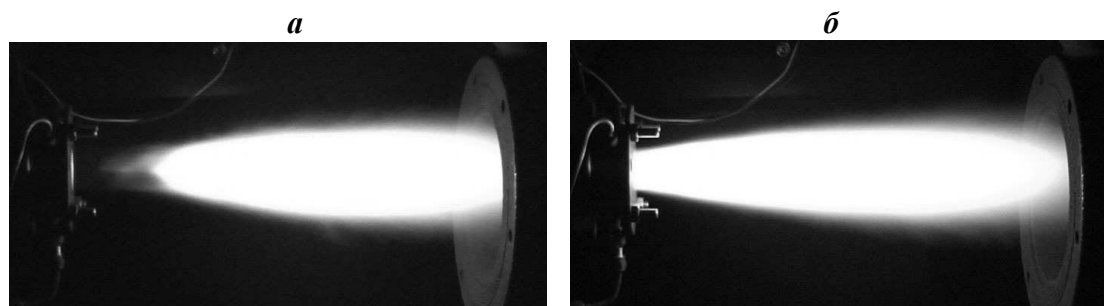


Рис. 5. Вид пламени за каналом при отсутствии (а) и наличии подачи дополнительного  $H_2$  в секцию канала.

В данных экспериментах при подаче химически активных добавок происходит воздействие непосредственно на пламя образующихся активных радикалов, которые ускоряют процесс воспламенения и увеличивают интенсивность горения, что и приводит к изменению режима горения в каналах. Энергетическое воздействие возможно также на воздушный поток, но это сначала изменяет газодинамическую структуру течения, а затем происходит перестройка режимов горения. Проверялись методы воздействия в виде дросселирования потока, импульсно-периодического ввода плазмы от плазмотрона малой мощности, а также детонационное воздействие. Исследования в изотермическом потоке показали, что скорость перемещения газодинамических структур составляет 5-30 м/с [3], что требует времени воздействия не менее 20 мс для сдвига системы скачков на длину канала 0,2 м. При этом энерговод в канал за псевдоскачком приводит к его перемещению как единого целого вверх по каналу. В то же время импульсное воздействие перед псевдоскачком приводит к разрушению его газодинамической структуры, которая сразу же (за  $t \sim 1$  мс) восстанавливается после прекращения энергетического воздействия. Эксперименты показали, что для создания псевдоскачковой структуры течения в горячем

потоке при наличии слабого диффузионного режима горения водорода, требуется мощность воздействия порядка 4-5% от мощности всего потока, в осесимметричном канале постоянного сечения. При недостаточной мощности импульсов возможно только локальное кратковременное усиление интенсивности горения, по сравнению с чисто диффузионным режимом горения, что видно на рис. 6 (прямые фотографии пламени в кварцевых окнах по оси канала) и на рис. 7 (локальное изменение величины статического давления в канале).

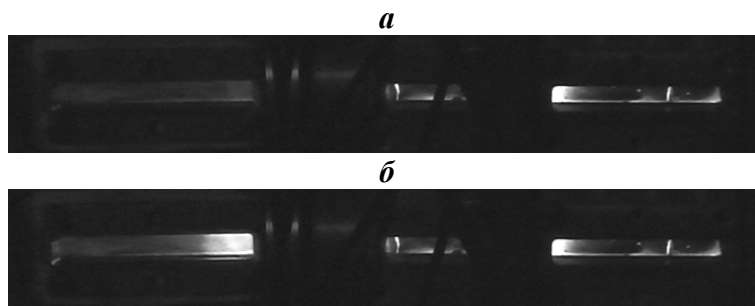


Рис. 6. Фотография пламени по оси канала при отсутствии (а) и наличии (б) энергетического воздействия.

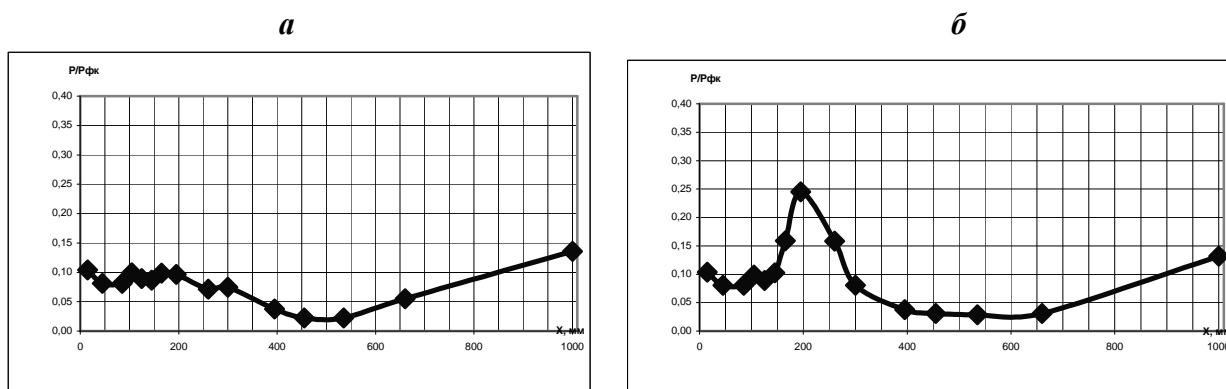


Рис. 7. Распределение статического давления по длине канала при отсутствии энергетического воздействия (а) и при подаче импульса (б), недостаточного для перевода течения в псевдоскачковое (3% от мощности потока).

### Заключение

Таким образом, в работе показано, что кратковременное энергетическое воздействие на высокотемпературный воздушный поток позволяет управлять процессом горения как в свободном пространстве, так и в каналах, интенсифицируя и изменяя режимы горения. Кинетическое воздействие происходит непосредственно на пламя, а при вводе энергии в воздушный поток происходит перестройка структуры течения, приводящая затем к изменению режима горения. Мощность энергетического воздействия, достаточная для эффективного воздействия на процесс горения, составляет 4-5% от мощности основного воздушного потока.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00998.

### Список литературы

1. Третьяков П.К. Псевдоскачковый пульсирующий режим горения. Шестой Международный Аэрокосмический Конгресс. Тезисы докладов. М.: МГАТУ им. К.Э. Циолковского. 2009. С.80–81.
2. Забайкин В.А. Качество высокоэнтальпийного потока при электродуговом подогреве воздуха в установке для исследования сверхзвукового горения. ФГВ. Т.39, №1. 2003. С.28–36.
3. В.А. Забайкин, А.А. Смоголев. Скорость перемещения псевдоскачка при дросселировании и подводе энергии. Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIV Академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2010. С.183.