

УДК 536.46

**УПРАВЛЕНИЕ ПСЕВДОСКАЧКОМ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ****Забайкин В.А.***Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г.Новосибирск  
lab2@itam.nsc.ru***Аннотация**

Экспериментально показана возможность и способы управления псевдоскачком в гладком канале постоянного сечения периодическим энерговодом различного типа. Определена скорость перемещения газодинамических структур псевдоскачка в изотермическом случае и в реагирующем потоке.

**CONTROL OF PSEUDO SHOCK BY NON-STATIONARY EFFECT**

The capability and ways of control of pseudo shock in the smooth channel of constant area by periodic energy supply of various types is experimentally shown. Displacement speed of gas-dynamic structures of pseudo shock in an isothermal case and in a reacting flow is determined.

**Введение**

Переход от сверхзвукового режима течения в каналах к дозвуковому сопровождается повышением статического давления и при определённых условиях (числах Маха потока свыше 1.5, наличии пограничного слоя и достаточной длины канала – не менее 5-10 калибров) происходит в сложной системе скачков уплотнения, которая впервые была исследована в [1] и названа псевдоскачком. Такая газодинамическая система (состоящая из прямых, косых,  $\lambda$ -образных скачков уплотнения) возникает в газодинамических лазерах, воздухозаборниках двигателей сверхзвуковых самолётов, диффузорах сверхзвуковых аэродинамических труб и в камерах сгорания прямоточных двигателей [2-6]. 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 [3,7]. Интерес к псевдоскачковому режиму горения связан с тем, что при его организации происходит резкая интенсификация процесса смешения топлива с окислителем и возрастают скорости химических реакций (вследствие повышения давления и температуры). Это приводит к интенсификации процесса горения и сокращает длину пламени [7-9].

В то же время управление положением псевдоскачка представляет значительную трудность, как при изотермическом течении, так и особенно при организации горения. Поддержание одинаковых начальных параметров потока на входе в канал не гарантирует однозначного соответствия режимов горения – возможна реализация резко отличающихся режимов: от слабого диффузионного горения (или даже невоспламенения топлива) до интенсивного (в псевдоскачке или при тепловом заклинивании). Данная проблема обостряется в гладких каналах, а обычные способы управления путем введения стабилизаторов типа ниш, уступов, пилонов и т.п., приводят к значительным потерям полного давления; при этом положение псевдоскачка оказывается жестко привязано к элементам стабилизаторов. Кроме того, практически нет работ по изучению динамики движения псевдоскачка при быстром изменении внешних условий, так как все исследования проводились при стационарных параметрах. Начатые в ИТПМ СО РАН работы по внешнему энергетическому воздействию на газодинамику потока показали перспективность применения импульсно-периодического

воздействия для управления псевдоскачком и позволили получить предварительные результаты в случае изотермического течения [10,11].

В представленной работе показана возможность и исследованы некоторые способы управления псевдоскачком в гладком канале постоянного сечения периодическим энерговодом в не реагирующий поток и при наличии горения. При этом применение как единичного, так и импульсно-периодического воздействия на воздушный поток позволило воздействовать на структуру потока, производить переход к псевдоскачковому режиму течения, и изменять положение псевдоскачка в канале.

### Результаты экспериментов

Экспериментальный стенд, на котором проводились работы, описан в [12]. На нём возможно создание сверхзвукового холодного и горячего воздушного потока. При этом подогрев воздуха производится плазмотроном мощностью 2 МВт, в том числе до температур, достаточных для самовоспламенения водорода (достижимый диапазон температур торможения  $T_0 = 1200 \div 3000$  К). Применение охлаждаемых профилированных сопел позволяет проводить длительные непрерывные эксперименты (не менее десятков секунд), в которых можно создавать энергетическое воздействие на поток и наблюдать динамику эволюций газодинамических структур, в том числе псевдоскачка. Исследования проводились в осесимметричном канале диаметром 50 мм, с числом Маха воздушного потока на входе, равным  $M=2.2$  (рис.1,*а*). Длина канала могла меняться от 200 до 550 мм (максимальная длина, соответствует рисунку). В боковую стенку канала могли вставляться кварцевые окна высотой 10 мм, что делало доступным для оптических наблюдений центральную часть потока. В случае изотермического течения проводилась теневая регистрация положения скачков уплотнения (рис.1,*б*); в горячем потоке при наличии горения фиксировалось наличие пламени в видимом диапазоне и положение зон горения водорода в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

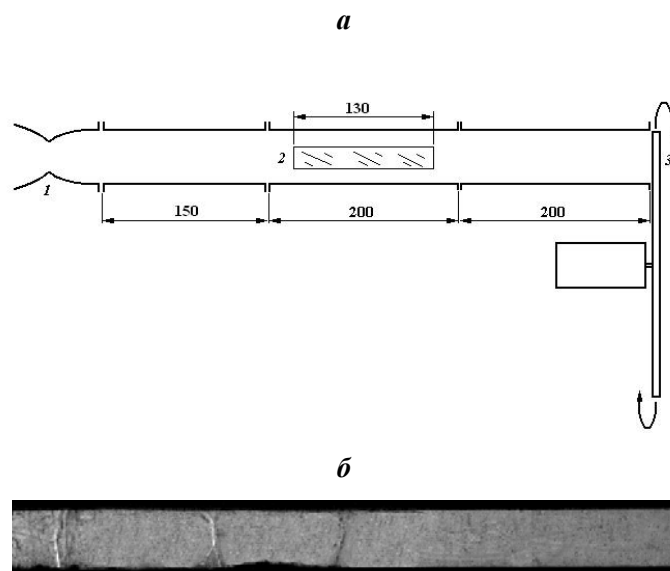


Рис.1. *а* – схема канала и дросселирования выходного сечения для не реагирующего потока: 1 – сверхзвуковое сопло  $M=2.2$ ; 2 – кварцевое окно; 3 – устройство для периодического перекрытия выходного сечения. *б* – шлирен-регистрация волновой структуры псевдоскачка в осевой части потока.

Экспериментально исследовано 4 способа энергетического воздействия на течение в канале: механическое дросселирование выходного сечения канала, впрыск плазмы от импульсно-периодического плазмотрона (рис.2), периодическое детонационное воздействие и вдув воздуха со стенки. Частоты воздействия находились в диапазоне от 1 до 25 Гц.

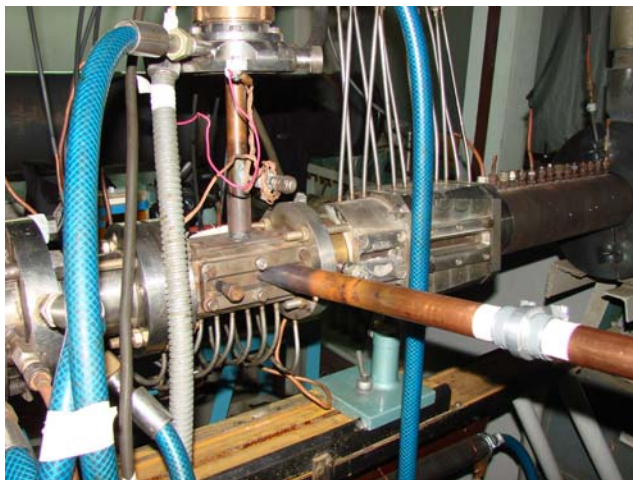


Рис.2. Подвод энергии в секцию канала от импульсно-периодического плазмотрона мощностью 20 кВт (сверху) и через детонационную трубку (сбоку).

Независимо от вида, ввод возмущений в конце канала приводил к перемещению псевдоскачка вверх и вниз по потоку. В холодном потоке боковые стенки, оснащенные кварцевыми стёклами, позволяли наблюдать структуру псевдоскачка. Применение скоростной шпирен-регистрация дало информацию об изменении структуры и скорости передвижения псевдоскачка. Эта информация также сопоставлялась с измерениями статического давления по длине канала. Необходимо отметить, что перемещение псевдоскачка происходит, когда в начальный момент времени (т.е. в невозмущенном потоке) псевдоскачок частично заходит в канал. При полном начальном отсутствии в канале псевдоскачка, для его появления требуется ввод энергии достаточной мощности и длительности, что также требует изучения.

В холодном потоке при частотах воздействия до 25 Гц псевдоскачок перемещается по каналу как единое целое (с сохранением расстояния между соседними газодинамическими структурами в пределах 10%), а скорость его перемещения достигает десятков метров в секунду. Скорость движения вверх по потоку (после подачи энергоимпульса) на 20-50% выше скорости перемещения вниз по потоку (после снятия возмущений). На рисунках 3-6 показана скорость перемещения псевдоскачка, определённая оптическим методом по изменениям положения первых скачков уплотнения газодинамической структуры псевдоскачка, при механическом дросселировании выходного сечения канала (схема соответствует рис.1,а). Регистрация производилась с частотой 1000 кадров в секунду. Время экспозиции составляло 1/15000-1/10000 с. На рисунках 3-6 приведены результаты измерения скорости для частот дросселирования (перекрытия)  $f = 4.4$  и  $12.2$  Гц, при движения вверх и вниз по каналу.

Полученный результат, показывающий консервативность газодинамической структуры псевдоскачка, вероятно связан с относительно небольшой (существенно дозвуковой) скоростью передвижения псевдоскачка при динамическом воздействии. При этом скачки уплотнения, составляющие газодинамическую структуру псевдоскачка, успевают подстраиваться к меняющимся внешним условиям.

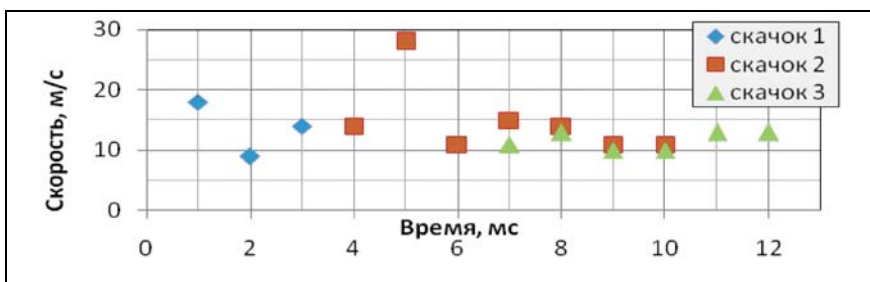


Рис.3. Скорость движения псевдоскачка вверх по каналу при частоте дросселирования  $f = 4.4$  Гц.

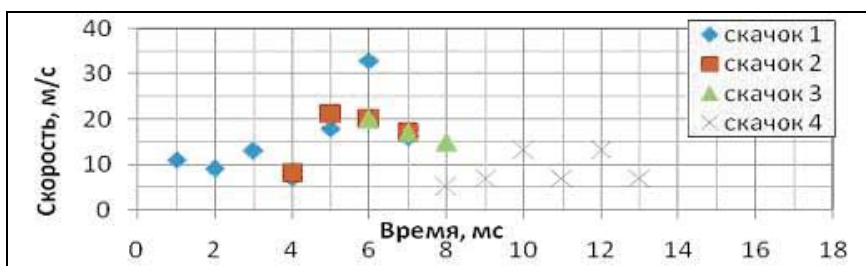


Рис.4. Скорость движения псевдоскачка вниз по каналу при частоте дросселирования  $f = 4.4$  Гц.

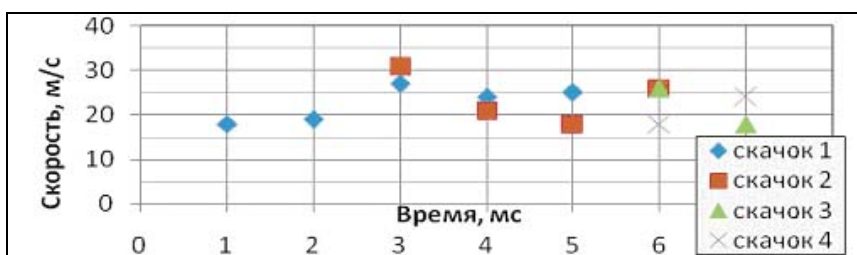


Рис.5. Скорость движения псевдоскачка вверх по каналу при частоте дросселирования  $f = 12.2$  Гц.

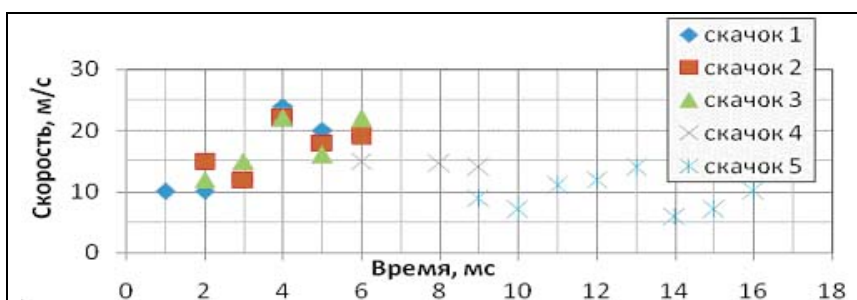


Рис.6. Скорость движения псевдоскачка вниз по каналу при частоте дросселирования  $f = 12.2$  Гц.

Из графиков скоростей для двух частот  $f$  перекрытия видно, что соответствующие скорости перемещения псевдоскачка при  $f = 4.4$  и  $12.2$  Гц находятся в диапазонах  $10-30$  м/с для движения вверх по течению и  $7-25$  м/с при движении вниз по течению. При этом скорость движения газодинамических структур в осесимметричном канале имеет максимум через  $3-6$  мс после начала движения, но достаточно близка к постоянной величине в начале и конце перемещения. Измерения скорости движения по изменению статического давления на стенке канала показали близкие результаты; в то же время эти измерения имеют меньшую точность, особенно в отношении движения вниз по потоку.

В горячем реагирующем потоке шлирен-регистрация затруднена и поэтому приходилось ориентироваться на измерения статического давления и в некоторых случаях на движение фронта пламени. На рис.7 показана последовательность движения зоны горения водорода вверх по потоку при кратковременной подаче дополнительного воздуха в конец канала. При этом происходила перестройка от диффузионного режима горения к псевдоскачковому. Съёмка произведена через окно длиной 120 мм (видимая зона 115 мм), время между кадрами – 0.04 с. Подача водорода – с осевого инжектора;  $M_{H_2} = 2.7$ .



Рис.7. 4 последовательных кадра движения зоны горения вверх по потоку. Параметры воздушного потока:  $M=2.2$ ;  $T_0 = 1800$  К;  $P_0 = 7 \times 10^5$  Па.

Оценка скорости передвижения даёт примерную величину  $V \approx 1.4$  м/с. По данным измерений статического давления, с регистрацией параметров через каждые 0.002 с, скорость лежит в пределах 0.35-1.1 м/с (рис.8), что близко к оценке, полученной по перемещению зоны свечения (рис.7).

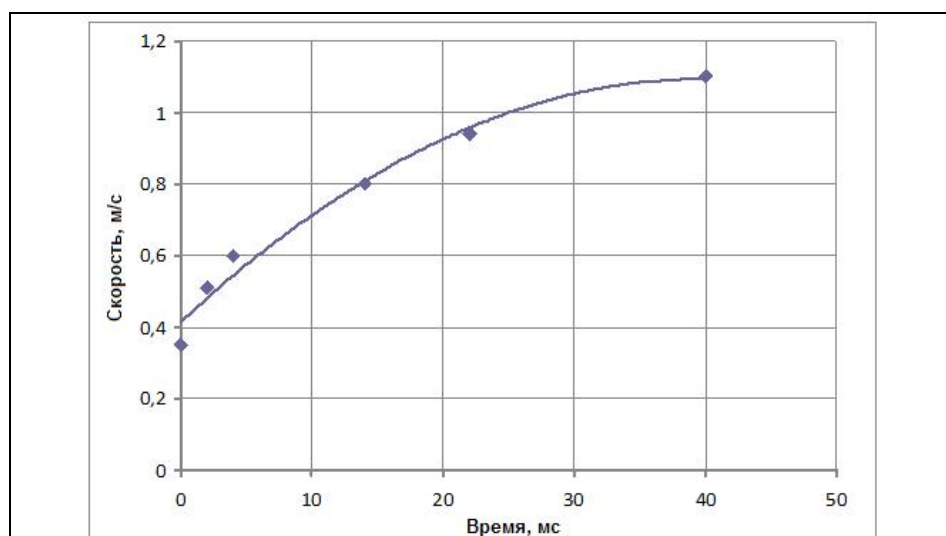


Рис.8. Скорость движения псевдоскачка вверх по потоку, по измерениям статического давления на стенке канала. Режим соответствует рис.7.

Как видно, эти величины меньше скоростей, зафиксированных в не реагирующем холодном потоке. Это требует дальнейшего изучения и возможно связано со взаимодействием процесса воспламенения (и горения) водорода и скачками уплотнения газодинамической структуры псевдоскачка. Совместное действие двух факторов даёт временное отставание движения псевдоскачка в реагирующем потоке по сравнению с распространением возмущений только газодинамическим способом. Также, в отличие от изотермического случая, измерения показывают непрерывное увеличение скорости, от момента начала движения до его завершения. В этой фазе (максимального продвижения) наблюдается практически полное выгорание водорода (подаваемого с осевого инжектора в начальной части канала) в реализующемся псевдоскачке. На рис.9 приведён пример регистрации непосредственно зоны горения водорода в УФ-области спектра, что даёт наиболее точную дающую информацию о локализации пламени [13]. Регистрация производилась на комбинацию электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с камерой технического зрения, при выделении излучения радикала ОН ультрафиолетовым светофильтром.

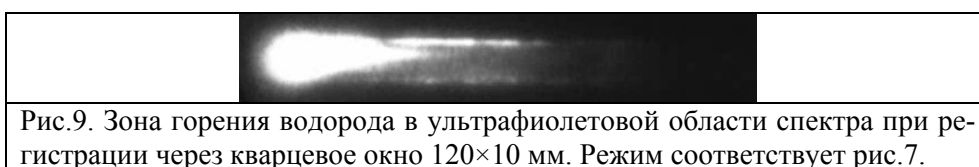


Рис.9. Зона горения водорода в ультрафиолетовой области спектра при регистрации через кварцевое окно 120×10 мм. Режим соответствует рис.7.

Такое сокращение длины зоны горения наблюдается и при других видах энергетического (включая кинетическое) воздействия. На рис.10 показан вид пламени при энергоотводе в поток с помощью детонационной трубки (место воздействия показано стрелкой).

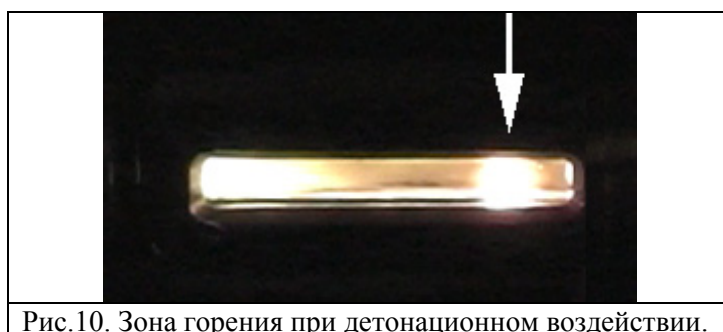


Рис.10. Зона горения при детонационном воздействии.

Необходимо отметить, что на перестройку режимов течения (и горения) оказывают влияние как длительность, так и энергетика отдельного импульса. При коротких временах энергоотвода ( $\sim 1$  мс) поток не успевал перестроиться и квазистационарного псевдоскачкового режима не возникало. Длительность импульса  $\approx 16-20$  мс приводила к чётко фиксируемому повышению давления и последующему движению псевдоскачка. Возможно, что серия коротких импульсов будет действовать аналогично одному длительному, но требуется дальнейшая экспериментальная проверка.

При малой энергии импульса также становится невозможным управление псевдоскачком и/или его реализация. Так, воздействие плазмотроном с энергией импульса до 400 Дж, является эффективным методом управления псевдоскачком в холодном потоке, однако становится недостаточным при нагреве потока до температур свыше 1500 К. Оценки показали, что воздействие на реагирующий поток становится реальным при энергетике воздействия составляющей  $\approx 3-4$  % от уровня внутренней энергии потока. Работа указывает на необходимость дальнейшего изучения динамики поведения псевдоскачка, в том числе проведения экспериментов для получения точных данных по пороговому энергетическому и временному уровню воздействия на высокоэнтальпийный реагирующий поток.

## Заключение

В результате проведенных экспериментов показана возможность динамического управления псевдоскачком в гладком канале, осуществляемого путем энерговода в воздушный поток или дросселирования канала в выходном сечении. В осесимметричном канале диаметром 50 мм с начальным числом Маха 2.2 определена скорость перемещения газодинамических структур псевдоскачка в изотермическом случае и в высокотемпературном потоке при горении водорода. Показан консерватизм (неизменность структуры псевдоскачка) при его движении вверх и вниз по каналу в изотермическом случае. При этом скорость перемещения находится в диапазоне 10-20 м/с и примерно на порядок превышает скорость перемещения псевдоскачка в высокотемпературном потоке при организации процесса горения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-08-00998.

## Литература

1. Neuman E.P., Lustwerk F. Supersonic Diffusers for Wind Tunnels // *Journal Appl. Mech.*, 1949, Vol. 16, No. 2, P.195–202.
2. Крокко Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений (Гл. 2) // *Основы газовой динамики* / Под ред. Г. Эммонса. М.: Изд-во иностр. литературы, 1963, 702 с.
3. Щетинков Е.С. О кусочно-одномерных моделях сверхзвукового горения и псевдоскачка в канале // *Физика горения и взрыва*, 1973, Т. 9, № 4, С. 473–483.
4. Пензин В.И. / Об условиях оптимизации сверхзвуковых течений с системой косых скачков уплотнения и последующим теплоподводом. М.: Изд. ЦАГИ, 2008, 160 с.
5. Гуськов О.В., Копченев В.И., Липатов И.И., Острась В.Н., Старухин В.П. / Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 168 с.
6. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. Торможение сверхзвукового потока в прямоугольном канале постоянного сечения // *ПМТФ*, 1984, № 6, С. 48-57.
7. Третьяков П.К. Псевдоскачковый режим горения // *Физика горения и взрыва*, 1993, Т. 29, № 6, С. 33–38.
8. Забайкин В.А., Третьяков П.К. Исследование процессов горения применительно к ГПВРД // *Химическая физика*, 2004, Т. 23, № 4, С. 47–51.
9. Строкин В.Н. Результаты экспериментального исследования стабилизации горения и выгорания водорода в модельных камерах сгорания ГПВРД // *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики*, 2000, № 2, С. 33–40.
10. Забайкин В.А., Смоголев А.А. Скорость перемещения псевдоскачка при дросселировании и подводе энергии. Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIV Академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2010, С. 183.
11. Третьяков П.К. Псевдоскачковый пульсирующий режим горения. Шестой Международный Аэрокосмический Конгресс. Тезисы докладов. М.: МГАТУ им. К.Э. Циолковского. 2009, С.80–81.
12. Забайкин В.А. Качество высокоэнтальпийного потока при электродуговом подогреве воздуха в установке для исследования сверхзвукового горения // *Физика горения и взрыва*, 2003, Т.39, № 1, С.28–36.
13. Баев В.К., Головичев В.И., Третьяков П.К. и др. / *Горение в сверхзвуковом потоке*. Новосибирск: Наука, 1984.

Статья поступила в редакцию 27 мая 2011 г.