

МАСШТАБ ВИХРЕВЫХ ЗОН ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

В. А. Забайкин, А. А. Смоголев

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

Рассмотрены процессы вихреобразования при диффузионном горении топлива в сверхзвуковом высокотемпературном воздушном потоке. Анализируются результаты экспериментальных и расчетных работ по исследованию масштаба вихрей, изменения их размера, взаимосвязи с волновой структурой течения и интенсивностью горения.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, горение водорода, волновая структура, масштаб зон горения.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы смешения и горения в сверхзвуковых потоках неразрывно связаны и сопровождаются вихреобразованием, которое происходит в пограничных слоях. При этом к настоящему времени недостаточно исследован масштаб возникающих вихревых зон горения, а также причины изменения их размера, хотя эта величина должна оказывать значительное влияние на интенсивность протекающих процессов. В данной работе на основе различных экспериментальных исследований рассматриваются масштаб вихрей, изменение их размера, а также связь с волновой структурой и интенсивностью горения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При исследовании процесса горения в сверхзвуковом потоке обнаружены зоны горения различного масштаба, включая дискретные и связанные вихревые структуры [1–5]. Сложность изучения таких структур в высокоскоростном реагирующем потоке обусловлена их малым размером, а также возможностями регистрирующей аппаратуры, особенно ее временного и пространственного разрешения. В сверхзвуковом потоке для надежного выделения зон размером 1 мм и менее требуется время экспозиции $\lesssim 10^{-6}$ с, что накладывает значительные ограничения на возможности регистрации данных процессов. В [5] зоны горения малых масштабов зафиксированы,

например, методом PLIF (планарной лазерно-индуцированной флуоресценции) с импульсной лазерной подсветкой при самовоспламенении и горении топлива, истекающего в спутный сверхзвуковой воздушный поток, а в [4] — методом шпирен-регистрации (с применением искровой подсветки) тонкой структуры зоны горения водорода в донной области тела. В обоих случаях размер микронзон горения в начале пламени составлял ≈ 1 мм (от ≈ 0.85 мм [4]), с тенденцией небольшого увеличения по длине пламени (до ≈ 1.2 мм [4]). В то же время в ряде работ при использовании несколько более длительных экспозиций ($\approx 10^{-5}$ с) показано существование вихревых зон горения размером на порядок больше (от 5 до 15 мм (рис. 1) в [2, 3] и ≈ 5 мм в [5]).

Важным является тот факт, что более крупные вихри наблюдаются при интенсивном горении топлива, в то время как не связанные в более крупные образования вихри малого масштаба коррелируют с горением слабой интенсивности. В работе [5] «пятнистые» зоны горения малой интенсивности наблюдаются толь-

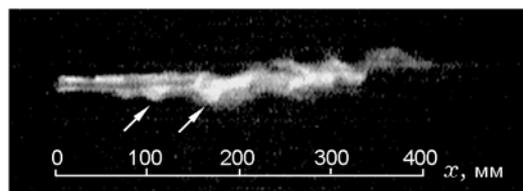


Рис. 1. Вихревые зоны горения в водородовоздушном пламени (показаны стрелкой), $M_{air} = 2.2$, $M_{H_2} = 2.7$, $t_{exp} = 10$ мкс

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-08-00735, 09-08-00998).

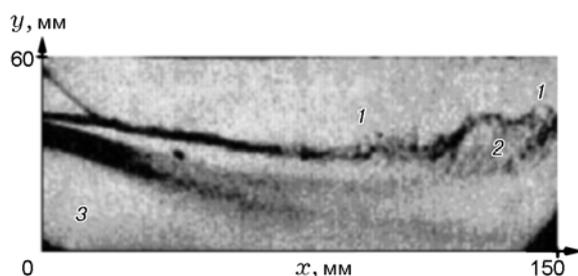


Рис. 2. Теневая фотография структуры течения при горении водорода в прямоугольном канале с уступом при сверхзвуковой скорости потока на входе:

поток движется слева направо; водород подается с уступа; 1 — зарождение вихря и «пузырек», $d = 1$ мм; 2 — зона смешения с «вихрем», $d \approx 5$ мм; 3 — зона рециркуляции за уступом; размер окна 60×150 мм

ко вблизи инжектора, в так называемом режиме слабого воспламенения (weak mode of self-ignition) [6]. На рис. 2, полученном с помощью скоростной камеры СФР для случая горения в прямоугольном канале с уступом [7], можно различить оба характерных размера — это «первая волна» и «пузырек» диаметром 1 мм, а также начало образования более крупных вихрей размером ≈ 5 мм.

В работе [8] также зафиксированы разные масштабы вихревых образований при перпендикулярной подаче водорода со стенки из отверстия диаметром 2 мм в сверхзвуковой воздушный поток. Так как экспозиция составляла $100 \div 200$ нс, то частично разрешима структура и крупных (размером ≈ 5 мм) образований (рис. 3, а, в), и меньшего размера ($\approx 0.5 \div 1$ мм). На рис. 3, б видны мелкие вихри, из которых складывается большое «вихреобразование». Эти фотографии подтверждают, что крупные вихри могут состоять из более мелких, но выявление «внутренней» структуры больших вихрей в сверхзвуковом реагирующем потоке является очень сложной задачей, так как для качественной регистрации мелкомасштабных вихрей временное и пространственное разрешения должны одновременно быть на уровне не хуже 10^{-7} с и 0.5 мм соответственно.

В экспериментальной части работ ONERA (см. [5]) было обнаружено, что самовоспламенение топлива в сверхзвуковом высокотемпературном потоке начинается с отдельных, почти несвязанных очагов масштабом менее 1 мм (рис. 4, б) и только ниже по потоку наблюдаются

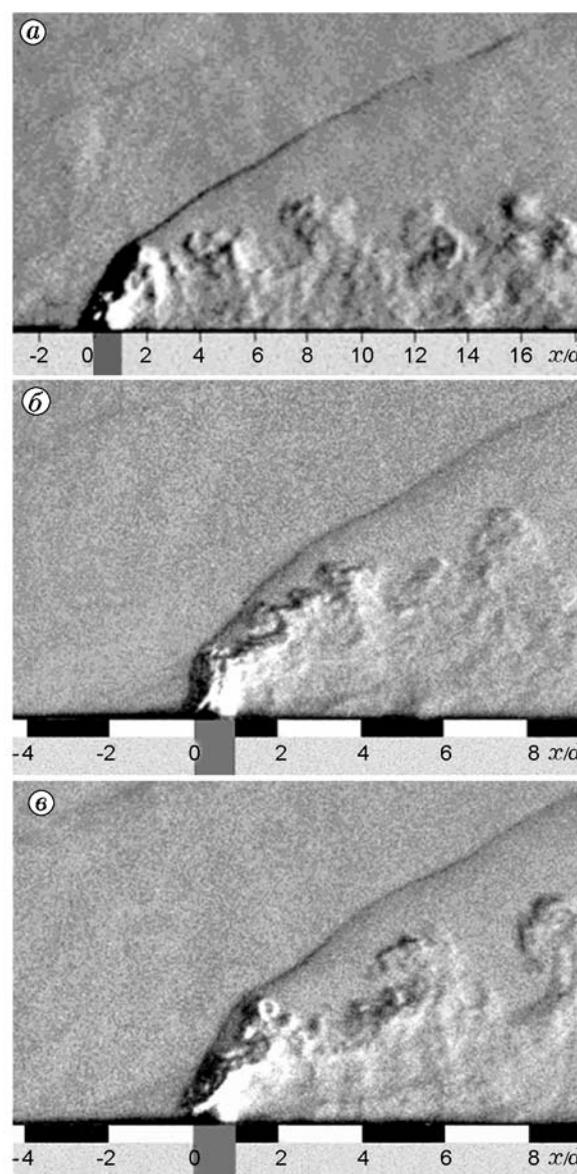


Рис. 3. Инжекция перпендикулярной струи водорода в сверхзвуковой поток:

параметры струи на выходе: для H_2 — $M = 1$; $u_{jet} = 1205$ м/с; $T = 246$ К; $d = 2$ мм. Скорость в свободном потоке $u_\infty = 2360$ м/с, $M = 3.38$; $T = 1290$ К. По оси x — отношение расстояния к диаметру отверстия $d = 2$ мм (фотографии из [8])

ся более устойчивые образования (вихри) большего масштаба, порядка 5 мм (рис. 4, в). В то же время сам процесс перехода от «пятнистого» мелкомасштабного начального горения к основному крупномасштабному здесь не был зафиксирован, поскольку регистрация пламени велась только в отдельных местах канала (рис. 4, а).

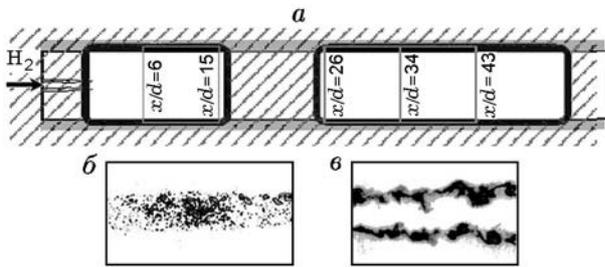


Рис. 4. Излучение радикалов ОН при горении водорода в сверхзвуковом потоке в канале сечением 45×45 мм, диаметр инжектора $d = 6$ мм, $T_0 = 1850$ К; $M_{air} = 2$; $M_{H_2} = 2$:

a — области оптической регистрации, *б* — зоны воспламенения ($6 < x/d < 15$), *в* — последующее горение водорода ($26 < x/d < 34$) (данные из [5])

Наиболее вероятно, что при отсутствии сильных возмущений происходит постепенное увеличение размеров «очагов горения» путем присоединения (и поджигания) соседних микрообластей, где на молекулярном уровне произошло смешение топлива с окислителем. Однако этот процесс относительно медленный и не до конца проясняет фиксируемый в экспериментах в сверхзвуковом потоке быстрый последующий переход к более крупному масштабу зон горения ($\approx 5 \div 10$ мм [2, 3, 5]) на границе зоны смешения. К примеру, механизм соединения двух вихрей (vortex pairing, рис. 5), описанный в [9], ведет к увеличению их размера, но не является быстрым.

Все более популярное в последнее время применение специальных инжекторов (в том числе так называемых гипермиксеров, эллиптических и т. п.) для изначального вихреобразования с целью лучшего перемешивания топлива с окислителем позволяет создавать значительные вихри начиная с места топливоподачи. В то же время фактор наличия волновой структуры, органически присущей струйным сверхзвуковым течениям (в первую оче-

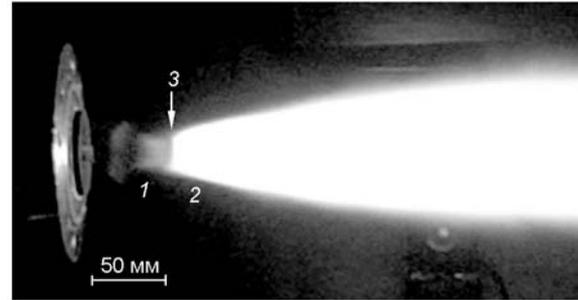


Рис. 6. Зона появления очагов слабого горения (1) и интенсификация (2) после скачков уплотнения:

3 — положение скачка уплотнения в сверхзвуковой ($M_{air} = 2.2$) нерасчетной воздушной струе; подача H_2 по оси сопла, $M_{H_2} = 1$

редь, на нерасчетных режимах истечения), не менее значим и в сверхзвуковом потоке способствует как быстрому вихреобразованию, так и интенсификации горения.

Наиболее вероятно, что и в работе [5] между начальным участком с очаговыми зонами горения ≈ 1 мм и последующей областью с развитыми вихрями размером ≈ 5 мм и интенсивным горением, где не было оптической регистрации, присутствуют значительные волновые возмущения, которые и привели к быстрому укрупнению масштабов зон горения.

В экспериментах, проведенных на установке сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха [10], в открытом пространстве зафиксированы области, которые соответствуют слабому горению с очагами размером ≈ 1 мм (поз. 1 на рис. 6) и интенсивному горению (поз. 2) с вихревыми зонами горения масштабом $5 \div 15$ мм. В условиях данного эксперимента (сверхзвуковая нерасчетная струя, истекающая в затопленное пространство) формируется система скачков уплотнения различной интенсивности. Фоторегистрация с длительной экспозицией ($10^{-1} \div 10^{-2}$ с) дает осредненную

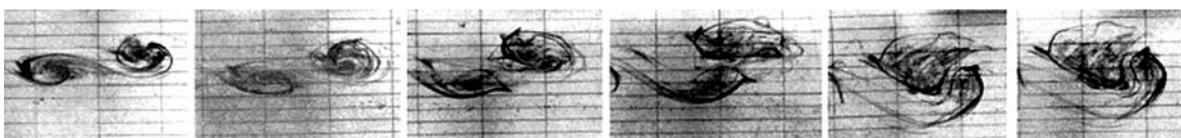


Рис. 5. Последовательность слияния двух вихрей (фотографии из [9], сетка 5×25 мм)

картину процесса, где хорошо различимы зоны с разной интенсивностью горения. Рис. 6 показывает, что процесс перехода от слабого горения (зона 1) к интенсивному (зона 2), важным компонентом которого являются макромасштабные зоны горения, резко ускоряется при наличии сильных возмущений (здесь — скачок уплотнения в начале второй «бочки» сверхзвуковой нерасчетной струи, поз. 3).

Это было подтверждено скоростной регистрацией в этих же условиях, зафиксировавшей развитие зон горения [2, 3]. Визуализация течения проводилась при помощи быстродействующего оптического комплекса DALSA 64K1M, частота регистрации 20 000 кадр/с. В связи с относительно большими временами экспозиции ($5 \cdot 10^{-5}$ с) зафиксировать зоны горения мелкого масштаба не удалось, но были выявлены развитие и перемещение крупномасштабных зон горения на периферии пламени (рис. 7). Области зарождения, резкой интенсификации горения, а также места замедления скорости передвижения с последующим догоранием находятся в местах воздействия волно-

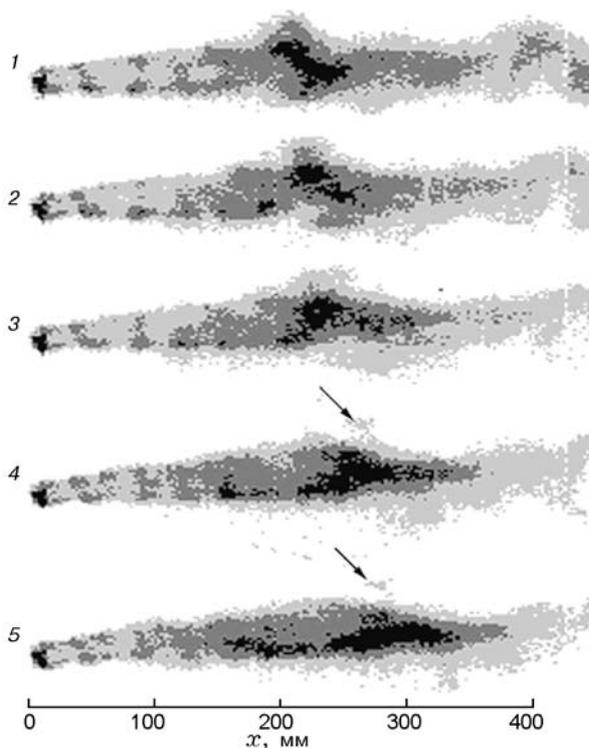


Рис. 7. Передвижение большой периферийной зоны горения (кадры 1–3); отрыв и догорание малой зоны (кадры 4, 5, показано стрелками), $t_{exp} = 50$ мкс, $T_0 = 2400 \div 2500$ К

вой структуры внешнего воздушного потока на слой смешения водорода с воздухом, причем места их зарождения оказались квазистационарными (3 ÷ 4 «бочки» сверхзвуковой нерасчетной внешней воздушной струи).

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментов и анализа существующих работ установлено, что процесс воспламенения и горения в сверхзвуковых реагирующих потоках происходит в зонах горения различного масштаба. Горение может начинаться в «микрizonaх» размером 1 мм и менее. Быстрая интенсификация горения наблюдается после появления сильных возмущений (скачков уплотнения); дальнейшее интенсивное горение связано с «макронами» горения на порядок большего размера (5 ÷ 15 мм). Волновая структура, органически присутствующая сверхзвуковым течениям и особенно отчетливо выраженная в струях (в первую очередь, на нерасчетных режимах истечения), оказывает сильное влияние на смешение топлива с окислителем (которое происходит не только прямым образом — за счет диффузии). При этом еще более улучшаются условия для реализации микрообъемного механизма горения в турбулентном воздушном потоке. Это, в свою очередь, может приводить к перераспределению интенсивности горения по объему пламени и сокращению его длины, причем не только в свободном пространстве, но и в каналах, вследствие неоднократных отражений скачков уплотнений от стенок и последующего воздействия на пламя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов С. С., Забайкин В. А., Пикалов В. В., Третьяков П. К., Чугунова Н. В. Исследование структуры диффузионного факела водорода в сверхзвуковой высокоэнтальпийной струе воздуха // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 5. — С. 3–5.
2. Воронцов С. С., Забайкин В. А., Мишурин А. А., Смоголев А. А. Экспериментальное исследование динамики развития зон горения водорода в сверхзвуковых нерасчетных струях // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 463–471.
3. Zabaikin V. A., Tret'yakov P. K., Vorontsov S. S., Smogolev A. A. Dynamics of mixing and combustion of hydrogen in a supersonic air stream // Micromixing in Turbulent Reactive

- Flows. — Moscow: Torus Press, 2004. — P. 133–139.
4. **Баев В. К., Гаранин А. Ф., Тюльпанов Р. С.** Структура диффузионного пламени водорода за конус-цилиндром при сверхзвуковом течении // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 1. — С. 129–132.
 5. **George E., Sabel'nikov V., Magre P.** Large eddy simulations and experimental study of self-ignition of supersonic hydrogen and methane-hydrogen jets in a vitiated confined supersonic air stream // Computational Combustion / D. Roekaerts, P. Coelho, B. J. Voersma, K. Claramunt (Eds). — ECCOMAS Thematic Conference. 18–20 July 2007, Delft, The Netherlands.
 6. **George E., Sabel'nikov V., Magre P.** Particularities of self-ignition of ethylene-hydrogen mixtures in unsteady thermal choking conditions: numerical unsteady RANS investigation // 2nd European Conf. for Aerospace Sciences. — EUCASS Association, 2007.
 7. **Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К. и др.** Горение в сверхзвуковом потоке. — Новосибирск: Наука, 1984.
 8. **Ben-Yakar A.** Experimental investigation of mixing and ignition of transverse jets in supersonic crossflows: Ph. D. Thesis. — Department of Mechanical Eng. Stanford University. December, 2000.
 9. **Winant C. D., Browand F. K.** Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixing-layers growth at moderate Reynolds number // J. Fluid Mech. — 1974. — V. 63. — Pt 2. — P. 237–255.
 10. **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.

Поступила в редакцию 10/XI 2008 г.