

## ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОЙ СПУТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУЕ

С. С. Воронцов, В. А. Забайкин, А. А. Смоголев, П. К. Третьяков

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

Подтверждено существование вихревых зон на внешней границе водородного факела в спутной сверхзвуковой струе воздуха. Анализ результатов экспериментов и сопоставление с известными расчетами показывают, что образование таких зон может быть связано с волновой структурой, возникающей при нерасчетном истечении воздушной струи. Размер вихревых зон горения увеличивается вдоль факела, а сами они могут способствовать улучшению смешения топливной и воздушной струй.

Ключевые слова: сверхзвуковая нерасчетная струя, горение водорода, вихревые структуры.

### ВВЕДЕНИЕ

При выборе способов управления горением в сверхзвуковых потоках необходимо учитывать воздействие скачков уплотнения и волн разрежения на структуру течения. Используя неоднородность газодинамической структуры струи, можно дискретно изменять место воспламенения топлива [1], создавать локальные зоны отрыва для стабилизации пламени [2]. В этой связи необходимо отметить, что хотя первые работы, где скачки уплотнения использовались для воспламенения топливной струи, появились достаточно давно (см., например, [3]), экспериментальных работ по изучению взаимодействия волновой структуры и пламени известно немного. Волновая структура струй проявляется в виде «бочек» и характеризуется значительными градиентами плотности, давления и температуры. Несмотря на то, что структура нерасчетных струй достаточно хорошо исследована (см. библиографию в [4]), здесь могут обнаруживаться совершенно новые явления. Сравнительно недавно установлено существование когерентных вихревых структур, создаваемых стационарными возмущениями Тейлора — Гёртлера, на начальном участке сверхзвуковых неизобарических струй, хотя следы их и ранее наблюдались на теневых снимках в виде чередующихся продольных полос [5]. В экспериментах [6–8] и расчетах [9] принималось во внимание влияние степени нерасчетности, например, на задержку воспламенения, но механизм взаимодействия скачков уплотнения с пламенем не рассматривался.

При исследовании горения обычно используют осредненные параметры струи и, как пра-

вило, учитывают только воздействие скачков уплотнения на факел либо изучают расчетные режимы истечения [10]. Такой подход связан с объективными трудностями измерения параметров в сверхзвуковых высокотемпературных реагирующих потоках, необходимостью применения сложной и дорогостоящей аппаратуры. В экспериментах достаточно легко можно зафиксировать внешнюю границу пламени. Факел обычно характеризуют параметрами, соответствующими осредненному стационарному течению. Изучение структуры внутренних областей с применением обычных методов исследований вызывает затруднения. Здесь наиболее информативным является метод регистрации изображения на длинах волн излучения промежуточных продуктов реакции [11]. В водородно-воздушных пламенах используется собственное излучение возбужденного радикала ОН, являющегося промежуточным продуктом окисления водорода и имеющего малое время высвечивания ( $\approx 10^{-8}$  с по данным [12]).

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха. Изучалась структура пламени водорода в спутной сверхзвуковой нерасчетной воздушной струе, подогретой до температуры самовоспламенения водорода и истекшей в затопленное пространство. Инжектор диаметром 10 мм для подачи водорода располагался по оси профилированного воздушного сопла с выходным диаметром 50 мм [13]. Типичные параметры экспериментов были следу-

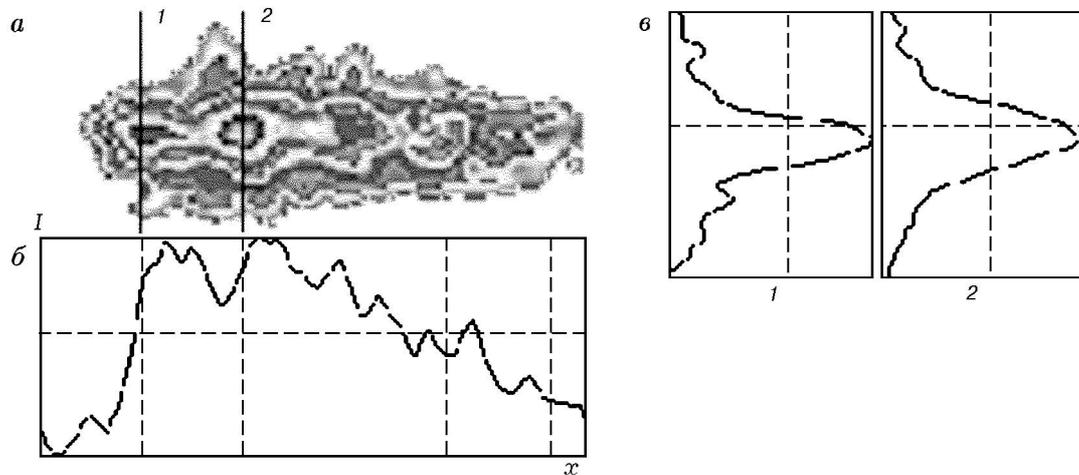


Рис. 1. Двумерное интегральное распределение интенсивности излучения факела  $H_2$  в ультрафиолетовой области спектра (а), вдоль оси (б) и в двух (1, 2) поперечных сечениях (в):  $G_1 = 2,7$  г/с,  $M_1 = 1$ ,  $T_2 = 2000$  К, развертка горизонтальная

ющими: температура торможения воздушного потока  $T_2 = 2000$  К, число Маха  $M_2 = 2,2$ , расход воздуха до 1 кг/с, степень нерасчетности  $n = 0,6 \div 0,7$ . Число Маха центральной водородной струи  $M_1$  в большинстве экспериментов равнялось единице, в части опытов  $M_1 = 2,7$ ; расход водорода составлял  $G_1 = 1,5 \div 4$  г/с; водород не подогревался. В экспериментах наблюдались устойчивое воспламенение и последующее горение на различных расстояниях от среза сопла, что определялось расходом подаваемого водорода [1].

Собственное излучение пламени водорода регистрировалось оптико-механическим сканером ЭФА-360УФ, в качестве приемника был использован фотоэлектронный умножитель ФЭУ-71. Излучение перехода  $2\Sigma^+ \rightarrow 2\Pi$  радикала ОН в диапазоне длин волн  $\lambda = 280 \div 320$  нм выделялось ультрафиолетовым светофильтром. Размерность получаемых двумерных изображений составляла  $128 \times 128$  точек; время сканирования кадра 0,3 с; время сканирования одной строки  $3 \cdot 10^{-3}$  с.

В последующих экспериментах регистрация пламени проводилась также камерами технического зрения с матричными кремниевыми приемными элементами и трансфокальным объективом. Область чувствительности этих камер лежит в видимой и ближней инфракрасной области спектра ( $\lambda = 380 \div 1100$  нм). Водородно-воздушные пламена не имеют собственного излучения в этой обла-

сти спектра, излучение обусловлено неконтролируемыми примесями, предположительно  $S_2$  [11]. Минимальное время экспозиции при регистрации «почти мгновенных» изображений равнялось 20 и 10 мкс. При скоростях потока  $\approx 10^3$  м/с за время экспозиции газ «пробежал» расстояние  $\approx 1$  см. Этот масштаб принимался за пространственное разрешение структуры потока в экспериментах. Для получения «осредненных» по времени изображений регистрация велась при экспозициях  $10^{-2} \div 10^{-3}$  с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1,а представлено зарегистрированное оптико-механическим сканером двумерное интегральное по лучу зрения изображение факела водорода в ультрафиолетовой области спектра. Поток воздуха направлен слева направо. На рис. 1,б показано распределение относительной интенсивности  $I$  излучения ОН вдоль оси, а на рис. 1,в — поперек факела в нескольких сечениях. Распределение интенсивности вдоль оси свидетельствует о значительной неоднородности ее по длине факела, которая была обнаружена ранее и связана с периодическим повышением и снижением скорости тепловыделения за скачками уплотнения в системе волновых структур сверхзвуковой воздушной струи [14]. Двумерная регистрация излучения факела и приведенное в [15, 16] восстановленное трехмерное изображение факела

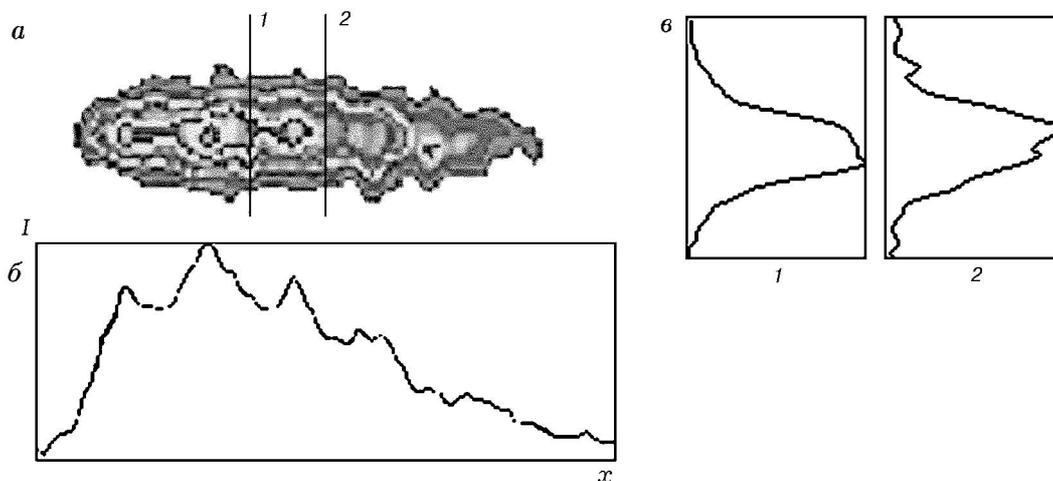


Рис. 2. Двумерное поле интенсивности излучения  $H_2$  (а), осевой (б) и поперечные (в) срезы при вертикальной развертке изображения в ультрафиолетовой области спектра:  
 $M_1 = 1, G_1 = 2,7 \text{ г/с}, T_2 = 2000 \text{ К}$

подтвердили эти особенности. Для трехмерной томографической реконструкции использовалось преобразование Абеля, применение которого требует симметричных входных проекций. При восстановлении изображения в рамках исходных допущений обнаружено также наличие кольцеобразных (вихревых) зон горения на периферии основного факела. В исходных регистрациях двумерного изображения распределения интенсивности излучения радикала  $OH$  (см. рис. 1, а и особенно 1, в) при перемещении вдоль факела также периодически наблюдается небольшое увеличение интенсивности горения ближе к границам водородного факела. Это хорошо заметно в сечении 1. В сечении 2 подобное увеличение интенсивности практически отсутствует.

В связи с достаточно большим временем сканирования факела при горизонтальной развертке полученное изображение границ верхней и нижней частей факела не в полной мере соответствует реальной динамической картине. Поэтому была выполнена серия экспериментов, в которой развертка проводилась вертикально. Из рис. 2 видно, что в этом случае также просматриваются с некоторой периодичностью отдельные небольшие зоны горения на периферии факела. Распределения интенсивности излучения в поперечных сечениях (рис. 2, в) подтверждают наличие таких зон.

Прямые фотографии пламени не дают убедительной информации о тонкой структуре факела. В отдельных случаях заметны внутрен-

ние зоны с повышенной интенсивностью горения за скачками уплотнения (см. рис. 3, а). Внешних зон (на периферии факела) обнаружить не удалось, что обусловлено длительной экспозицией при фотографировании. Тем не менее в результате восстановления трехмерной структуры [15, 16] отмечена возможность существования кольцевых зон горения на периферии. Для повышения достоверности результатов в дальнейших исследованиях применяли высокоскоростные камеры технического зрения, которые позволили зарегистрировать

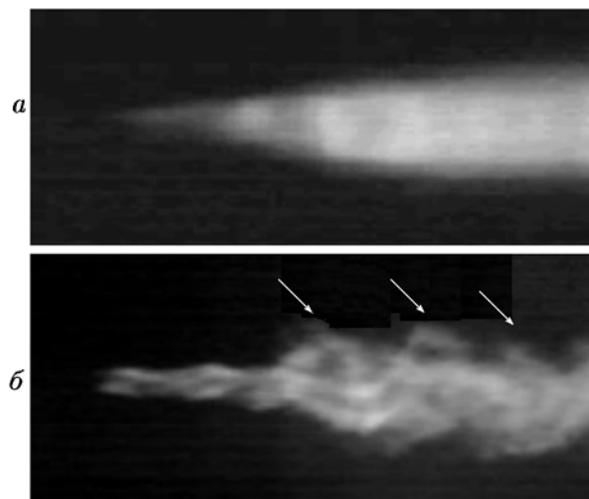


Рис. 3. Фоторегистрация горения звуковой струи водорода:  
 а —  $\tau = 10^{-2} \text{ с};$  б —  $\tau = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}; G_1 = 2,4 \text{ г/с}$