

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОЙ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

С. С. Воронцов, В. А. Забайкин, В. В. Пикалов,  
П. К. Третьяков, Н. В. Чугунова

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Приведены результаты исследования структуры факела при диффузионном горении водорода в спутной сверхзвуковой высокоэнтальпийной нерасчетной струе воздуха. На основе регистрации излучения в диапазоне длин волн  $260 \div 350$  нм в поперечных сечениях и по длине пламени получена трехмерная томографическая реконструкция факела, которая подтвердила взаимосвязь газодинамической структуры с интенсивностью горения. Экспериментально установлена возможность существования режимов с периодическими повторяющимися циклами полного погасания и последующего воспламенения водорода в соответствии с бочкообразной структурой нерасчетной струи. Отмечается существование локальных периферийных областей горения, что может свидетельствовать о наличии вихревых образований, которые в пространственном изображении (полученном в предположении осесимметричности излучения) имеют вид кольцевых зон. Не исключена возможность, что в реальном течении на периферии факела формируются спиралевидные структуры.

В работе приведены результаты исследования структуры пламени при горении водорода в сверхзвуковой высокоэнтальпийной нерасчетной струе воздуха. Сложность пространственной структуры пламени определяют динамика процесса смешения, сравнимые по величине времена пролета молекулой газа характерных элементов газодинамической структуры потока и суммарное время задержки воспламенения и горения водорода, а также взаимосвязь интенсивности горения с газодинамической структурой потока.

Ранее (см., например, [1]) было обнаружено, что выгорание водорода, подаваемого в сверхзвуковую нерасчетную струю воздуха, носит отчетливо выраженный периодический характер и связано с волновыми структурами (бочками) воздушной струи. При этом интенсивность горения по длине факела, определенная по излучению возбужденного радикала ОН, может изменяться в несколько раз. Однако в этих измерениях излучение регистрировали только вдоль оси пламени с интегрированием в плоскости, перпендикулярной направлению потока, что ограничивало возможности изучения структуры пламени в радиальном направлении. Кроме того, возможно особое протекание процесса, связанное с изменением характерного времени горения в нерасчетных струях. Оценки и эксперименты показывают [2], что сильное

изменение давления и температуры в «бочках» струи может привести к такому уменьшению характерного времени горения, что будет происходить полное затухание факела в областях течения с низкими параметрами. Экспериментально такие режимы в предыдущих исследованиях не обнаружены.

В предлагаемой работе излагаются предварительные результаты исследования процесса горения с использованием оптико-механического сканера ЭФА-360УФ, который может регистрировать двумерные изображения собственного излучения пламени в интервале длин волн  $260 \div 380$  нм, что соответствует излучению молекулы ОН [3]. Регистрацию проводили на персональном компьютере IBM PC, разрядность преобразования 8, размерность изображения  $128 \times 128$  точек, время сканирования кадра 0,3 с, интервал между кадрами 2 с, время сканирования строки 3 мс. Информацию предварительно обрабатывали с использованием программного пакета TVGS-2.0 [4] и стандартных графических средств системы WINDOWS. Для исключения случайных шумов исходная информация сглаживалась адаптированным медианным фильтром.

Эксперименты проводили на установке, описанной в [1], с прямоточным инжектором, установленным по оси воздушного сопла. Чис-

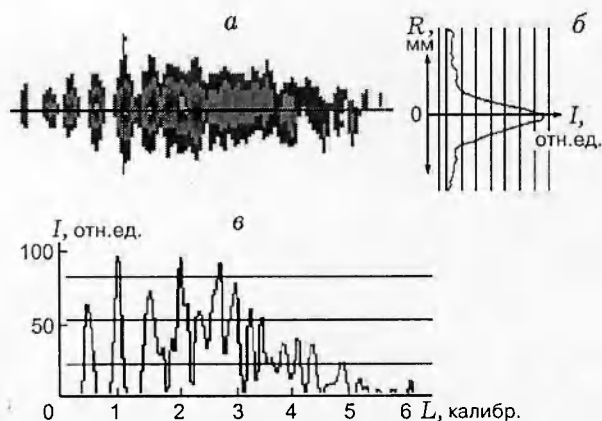


Рис. 1. Двумерное интегральное (а) и поперечное (б) распределения интенсивности излучения и распределение интенсивности горения вниз по потоку (в) для режима  $G_{H_2} = 2,7$  г/с

ло Маха воздуха на выходе из сопла составляло 2,2. Температура торможения во всех режимах равнялась 2000 К, давление торможения  $6,8 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, что соответствует степени нерасчетности  $n = 0,64$ . При таких параметрах воздушная струя немного сужается; на расстоянии 30 мм от среза сопла появляется небольшой центральный скачок уплотнения диаметром  $\approx 5$  мм (при диаметре сопла 50 мм). Затем образуется ряд периодических структур (бочек) длиной  $\approx 90$  мм каждая. Таким образом, в пределах области, где велось наблюдение ( $450 \div 500$  мм), могло существовать 5–6 устойчивых газодинамических структур, с которыми связаны стабилизация пламени и периодическое изменение интенсивности горения. Параметры потока воздуха и, следовательно, исходная газодинамическая структура потока во всех экспериментах оставались постоянными, скорость истечения водорода не превышала скорости звука, расход водорода  $G_{H_2}$  изменялся в пределах  $1,5 \div 5$  г/с.

На рис. 1,а приведено двумерное распределение интенсивности  $I$  излучения, а на рис. 1,б — распределение вдоль осевой линии потока. В этом режиме ( $G_{H_2} = 2,7$  г/с) интенсивность излучения между максимумами в начальной части факела падала до нуля, т. е. имели место периодические циклы полного погасания и последующего воспламенения. Такие особенности ранее в экспериментах не наблюдались. Отметим, что частота появления пи-

ков выше, чем частота «бочкообразных» структур сверхзвуковой нерасчетной струи. Эксперименты показали, что на фоне основного факела наблюдаются пики (локальные максимумы) с меньшей интенсивностью, но большей частотой. Эти локальные максимумы, возможно, не связаны с зонами повышения давления в ядре потока. Панорамная регистрация излучения всего факела показала наличие чередующихся зон горения небольшой интенсивности на периферии факела (рис. 1,б).

Для получения более наглядной и достоверной информации было восстановлено трехмерное изображение факела. Экспериментальные данные интерпретировали как набор интегральных излучений, и в каждом вертикальном сечении трехмерного эмиссионного объекта локальные распределения предполагали осесимметричными. В основу алгоритма трехмерной томографической реконструкции легло преобразование Абеля [5]. Как известно, использование этого преобразования возможно только при осесимметричных входных проекциях. С целью получения симметричных проекций из зарегистрированных данных в работе создан специальный метод симметризации. В нем при выборе точки, относительно которой проводится усреднение правого и левого крыльев распределения, используются два подхода. Первый заключается в симметризации проекции относительно ее максимума. Во втором подходе точка симметризации совпадает с центром масс средней части крыльев одномерной проекции. Выбор одного из этих способов осуществляется автоматически путем минимизации нормы отклонения правого крыла проекции от левого, достоверность восстановления тестировалась модельными вычислительными экспериментами.

Результат трехмерной томографической реконструкции одного из режимов горения,



Рис. 2. Трехмерное восстановление локальных распределений интенсивности горения для режима  $G_{H_2} = 4,6$  г/с

приведенный на рис. 2, подтверждает взаимосвязь газодинамической структуры с интенсивностью горения (темные области соответствуют более высокой интенсивности излучения). На рисунке видны также кольцеобразные зоны горения, появление которых, видимо, связано с отмеченными выше локальными максимумами в распределении интенсивности по длине пламени (см. рис. 1). Следует отметить, что технология получения первичной информации не позволяла регистрировать временную последовательность развития периферийных зон горения, поэтому пока нельзя сделать выводы о причине их возникновения и устойчивости существования. Это могут быть как стационарные, так и нестационарные образования, а также спиралевидные вихревые структуры, дающие при осесимметричной обработке кольцевые зоны горения.

Таким образом, проведенные измерения позволяют сделать следующие выводы.

- При горении водорода в высокоэнтальпийном сверхзвуковом потоке впервые достоверно зарегистрировано существование режима с периодически повторяющимися циклами полного погасания и последующего воспламенения.

- Панорамная регистрация и трехмерная обработка изображений факела подтвердили взаимосвязь газодинамической структуры с интенсивностью горения и показали наличие образований типа кольцеобразных (вихревых) или, возможно, спиралевидных зон горения на периферии основного факела.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Забайкин В. А., Лазарев А. М.** Влияние различных способов подачи водорода на его выгорание в сверхзвуковом потоке воздуха // Изв. АН СССР. Сер. техн. наук. 1986. Вып. 1, № 4. С. 44–49.
2. **Забайкин В. А., Лазарев А. М.** Экспериментальные исследования выгорания газобразного горючего при различных способах его подачи в сверхзвуковой высокоэнтальпийный поток воздуха // Моделирование процессов газодинамики и энергетики: Труды Всесоюз. конф. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1985. С. 260–264.
3. **Баев В. К., Воронцов С. С., Солоухин Р. И., Третьяков П. К.** Применение оптико-механической системы в комплексе с ЭВМ для изучения структуры пламен // Структура газофазных пламен: Материалы Всесоюз. семинара по структуре газофазных пламен. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1984. Ч. 2. С. 112–122.
4. **Борисов А. В., Воронцов С. С., Желтоволов А. А. и др.** Развитие экспериментальных и расчетных методов исследования сверхзвуковых отрывных течений. Новосибирск, 1993. (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 9-93).
5. **Пикалов В. В., Мельникова Т. С.** Томография плазмы. Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 1995. Вып. 13.

*Поступила в редакцию 19/III 1999 г.*