

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Ю.В. Захарова, Н.Н. Федорова, М.А. Гольдфельд

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
630090, ул. Институтская 4/1, Новосибирск, Россия*

Исследование процессов смешения и самовоспламенения воздушно-водородной смеси в канале камеры сгорания при сверхзвуковой скорости потока является актуальной задачей, тесно связанной с изучением прямоточных воздушно-реактивных двигателей. При сверхзвуковых скоростях потока смесь характеризуется низкими статическими параметрами и малым временем пребывания в канале камеры сгорания. Для стабилизации пламени в сверхзвуковом потоке используется обратный уступ, за которым формируется низкоскоростная высокотемпературная отрывная область. Наличие рециркуляционной зоны увеличивает время пребывания смеси в камере сгорания и формирует источник ее воспламенения [1]. Струйная инжекция топлива в сверхзвуковой поток в окрестности уступа существенно усложняет волновую картину течения, которая требует детального исследования и оценки влияния различных параметров: число Маха основного потока, коэффициент нерасчетности струи, температурные условия, геометрия канала и т.д.

Целью настоящей работы являлось численное и экспериментальное исследование процессов смешения и воспламенения при многоструйной инжекции в канал камеры сгорания. Экспериментальные исследования реагирующих течений в канале камеры сгорания проведены в импульсной высокоэнthalпийной аэродинамической установке ИТ-302М. Модель состояла из плоского профилированного сопла, секции изолятора и канала камеры сгорания, включающего инжекторную секцию постоянного поперечного сечения с уступом высотой 25 мм и расширяющуюся секцию. Многоструйная инжекция топлива осуществлялась из 8 круглых отверстий, расположенных перед уступом на верхней и нижней стенках инжекторной секции. Диаметр отверстий составлял 2.8 мм. В ходе эксперимента проводились измерения статического давления и тепловых потоков на стенках канала и визуализация течения.

Численное моделирование рассматриваемых течений было проведено в 3D постановке на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Моделирование воспламенения водорода в канале с уступом проводилось с помощью кинетической схемы [2], содержащей 38 реакций для 8 компонент:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ , а также приведенной кинетической схемы [3]. Расчеты выполнены с использованием ПО ANSYS CFD (Fluent).

Расчетная область задачи (рис. 1) была построена с учетом симметрии канала и ограничена входным (inlet) сечением слева, выходным (out) сечением справа, боковой (side wall) и нижней (bottom wall) стенками. В расчетной области была построена структурированная многоблочная сетка, имеющая сгущение к стенкам. В ходе расчета проводилась адаптация расчетной сетки по градиентам плотности и температуры.

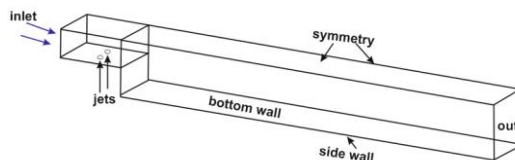


Рис. 1. Схема расчетной области

Параметры исследуемых течений представлены в Таблице.

Параметры	Внешний поток	Струя аргона	Струя водорода
Число Маха	4	1	1
Статическая температура, К	500	500	300
Статическое давление, бар	1	20	60

На первом этапе было проведено численное и экспериментальное исследование волновой структуры течения в канале без инжекции струй. Полученная в 3D расчетах волновая картина течения согласуется с экспериментальными данными и проведенными ранее 2D расчетами [4]. Далее было проведено исследование процесса смешения при инжекции под углом  $45^\circ$  струй аргона во внешний сверхзвуковой поток. Показано, что выдув струй приводит к существенной перестройке волновой структуры течения в канале. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по распределению статического давления на стенках канала показало хорошее соответствие (рис.2, а).

На следующем этапе выполнен расчет течения с инжекцией струй водорода под углом 45 и 90 градусов без учета/с учетом химических реакций. При поперечной инжекции струи водорода в сверхзвуковой поток происходит формирование “бочки”, что является типичным для недорасширенных струй. Кроме того, в данной области наблюдается локальное увеличение числа Маха ( $M \approx 7$ ), обусловленное резким расширением струи.

По результатам расчетов с учетом химических реакций получено, что воспламенение воздушно-водородной смеси происходит непосредственно за область инжекции водорода (рис. 2, б). Далее пламя распространяется вдоль стенок канала. Вблизи выходной границы расчетной области наблюдается устойчивое горение по всей высоте канала.

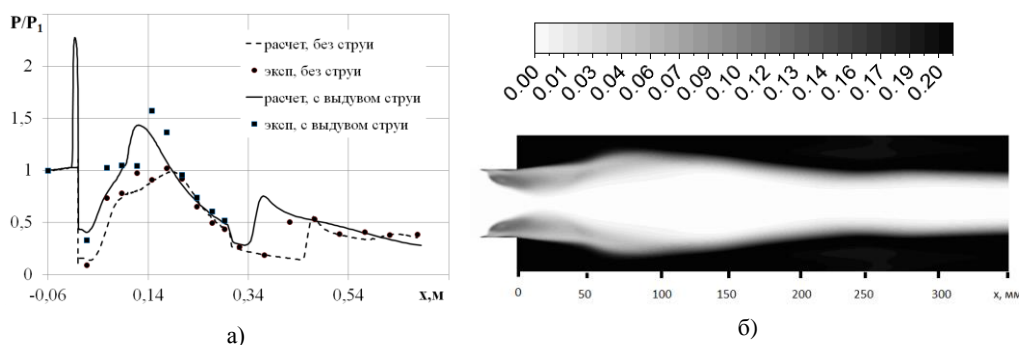


Рис. 2. Распределение статического давления на стенке канала (а) и массовая доля воды в плоскости симметрии (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ )

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karimi A., Wijeyakulasurya S.D., Razi Nalim M. Numerical study of supersonic flow over backward-facing step for scramjet application AIAA Paper 2012-4001. 2012.
2. Tien J. H., Stalker R. J., Combustion and Flame, 329-348 (2002).
3. Бедарев И.А., Рылова А.В., Федоров А.В. Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородовоздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва. 2015. Т.51, No.5. С. 22-33.
4. Бедарев И. А., Гольдфельд М. А., Захарова Ю. В., Федорова Н. Н. Исследование температурных полей в сверхзвуковом течении за обратным уступом // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т.16, No. 3. С. 375-386.