

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ «ХОЛОДНОГО» ВОДОРОДА ВО «ВЛАЖНОМ» ВОЗДУХЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА

О.С. Ванькова, Н.Н. Федорова

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

Физико-математическое моделирование поведения горючих газовых смесей в каналах технических устройств является актуальной проблемой из-за высоких скоростей потока и малого времени пребывания смеси в камере сгорания, что значительно затрудняет процессы смешения, самовоспламенения и стабильного горения. Сверхзвуковые турбулентные течения в каналах КС характеризуются сложной структурой и наличием областей отрыва и присоединения пограничного слоя. Моделирование сверхзвуковых течений в камере сгорания позволяет получить детальную информацию о структуре потока, выявить особенности рассматриваемого типа течения, а также оценить влияние основных параметров на процессы самовоспламенения и горения.

Исследование горения водорода в сверхзвуковых течениях представляет большие трудности, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Теоретическое исследование осложнено тем, что закономерности горения при сверхзвуковых скоростях определяются интенсивностью процессов турбулентного обмена, скоростями химических реакций в потоке и влиянием газодинамических эффектов, сопровождающихся тепловыделением. При этом каждый из перечисленных факторов может оказать существенное влияние на процессы смешения и горения [1]. В настоящее время водород считается одним из важных сырьевых ресурсов будущего. Это требует более точного представления о характеристиках его воспламенения и горения, а также о способах управления этими процессами.

Математическое моделирование течений в камере сгорания проведено в ANSYS Fluent на основе решения полных осредненных по Фавру уравнений Навье – Стокса вязкого теплопроводного газа, дополненных $k-\omega$ SST моделью турбулентности и блоком химических реакций. Использовался решатель на основе уравнения для плотности и AUSM схема [2] третьего порядка аппроксимации. Для моделирования процесса горения водородо-воздушной смеси использовалась детальная кинетическая схема [3] с 38 реакциями для 8 компонентов. Состав водородосодержащей смеси предполагался стехиометрическим. В [4-5] была выполнена верификация кинетической схемы [3] при численном моделировании эксперимента Burrows-Kurkov [6].

В настоящей работе проводились численные исследования самовоспламенения «холодной» струи H_2 подаваемой параллельно «влажному» горячему воздуху в канале с расширением [7]. Схема эксперимента и основные размеры представлены на рис.1,а. На рис.1,б, представлена геометрия расчетной области. Начальные данные для свободного потока и водородной струи даны в таблице 1. На стенках канала и на стенке трубки ставились условия прилипания для скорости и условие «холодной» стенки для температуры ($T_w = 300$ К). На границе выхода из камеры сгорания ставились стандартные атмосферные условия, $P_0 = 101325$ Па, $T_0 = 300$ К, массовая концентрация кислорода $O_2 \sim 21$ %. В таблице 1 представлены начальные данные для свободного потока и водородной струи.

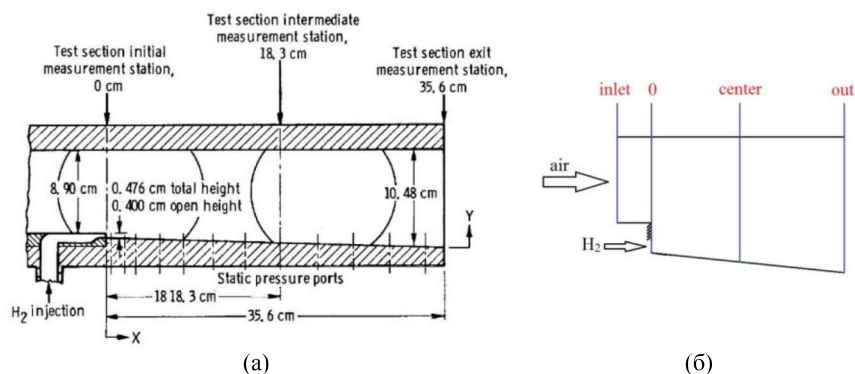


Рисунок 1. Схема эксперимента (а) и геометрия расчетной области (б)

Решение задачи реализовывалось в несколько этапов. На первом этапе, решалась задача о наращивании пограничного слоя на стенках прямого канала. На выходе из канала записывались профили турбулентных и газодинамических параметров. На втором этапе полученные профили подключались на входе камеры сгорания, и моделировалось «холодное» течение. На третьем этапе подключался блок химических реакций.

Таблица 1. Начальные данные

	Число Маха, М	Температура, Tst, К	Скорость, u, м/с	Давление, Pst, МПа	Массовая концентрация:			
					H2	O2	N2	H2O
Водородная струя	1	254	1216	0.1	1	0	0	0
Свободный поток	2.44	1270	1764	0.1	0	0.258	0.486	0.256

«Холодное» течение. На рис. 3 представлены профили температуры в сечении $X = 0$ см (а) и мольной доли компонент смеси (H_2 , N_2 и H_2O) в сечении $X = 35.6$ см (б). Расчетные кривые сравниваются с экспериментальными точками. На рис. 3, а, видно хорошее качественное и количественное согласование полученных в расчетах и экспериментальных данных безразмерной температуры. Так же видно, что толщина пограничного слоя на входе в камеру сгорания приблизительно равна $\delta \approx 1$ см.

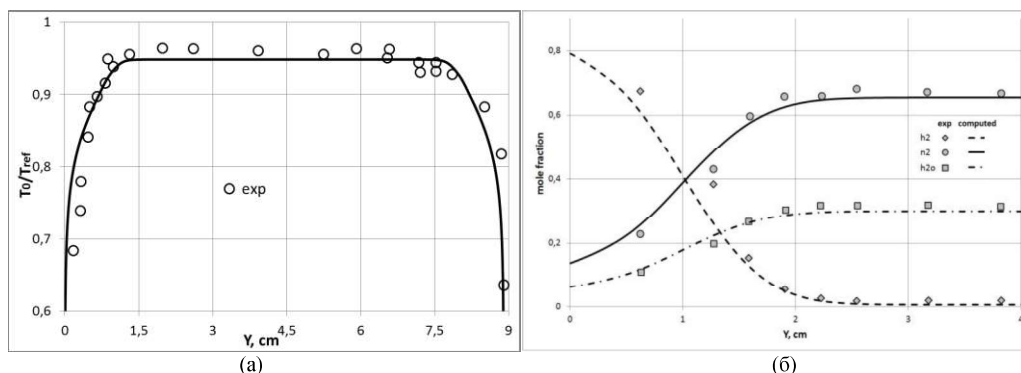


Рисунок 3. «Холодное» течение. (а) Профиль безразмерной температуры в сечении $X = 0$; (б) Профили мольной концентрации компонент смеси в сечении $X = 35.6$ см

На рис. 3, б, видно, что расчетные кривые находятся в хорошем качественном и количественном согласовании с экспериментальными точками.

Течение с горением. На рис.5 представлены профили давления Пито в сечениях $X = 0$ см и $X = 35.6$ см (а) и мольной доли компонент смеси (H_2 , O_2 , N_2 и H_2O) в сечении $X = 35.6$ см (б) камеры сгорания. Расчетные кривые сравниваются с экспериментальными точками. Для графика, представленного на рис.5, а, получено хорошее качественное и количественное согласование. На рис.5, б, расчетные профили мольной концентрации компонент смеси располагаются ближе к нижней стенке ($X=0$ см). Ширина струи горения в расчётах тоньше, чем в эксперименте, что связано с отсутствием взаимодействия турбулентности и химии.

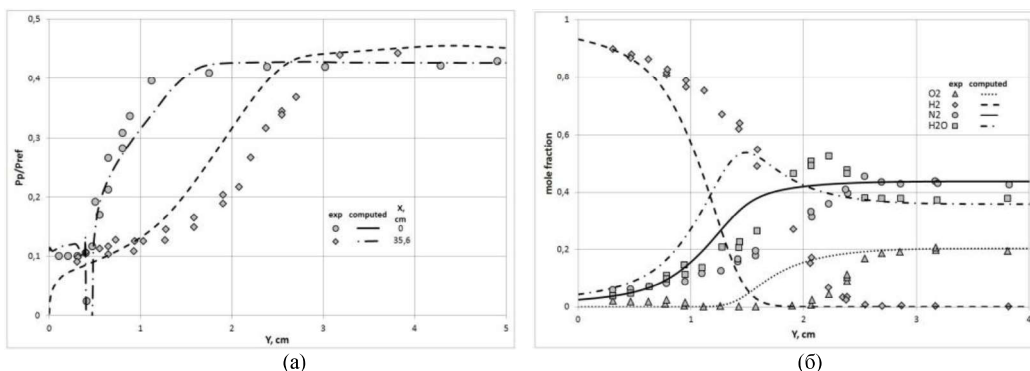


Рисунок 5. Течение с горением. (а) Профили давления Пито в сечениях $X = 0$ см и $X = 35.6$ см; (б) Профили мольной концентрации компонент смеси в сечении $X = 35.6$ см

Выводы. Исследованы процессы воспламенения и горения в полях течения, полученных при численном моделировании эксперимента Burrows-Kurkov [6].

Результаты, полученные в случае чистого перемешивания без сгорания, находятся в хорошем согласовании с экспериментом. При моделировании горения наблюдается, что слой горения находится ближе к нижней стенке, чем в эксперименте.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4) и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-08-01158 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Curran E.T., Heiser W.H. and Pratt D.T., Fluid phenomena in scramjet combustion system // Annual Review of Fluid Mechanics. 1996. Vol. 28, pp. 323-360.
2. Liou M.S. and Steffen C.J. Jr. A new flux splitting scheme // Journal of Computational Physics. 1993. Vol 107, No. 1. P. 23-39.
3. Tien J.H., Stalker R.J., Release of Chemical Energy by Combustion in a Supersonic Mixing Layer of Hydrogen and Air // Combustion and Flame, 2002. No. 130, pp. 329-348.
4. Бедарев И.А., Федоров А.В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. 2006. Т.42, No.1. С. 26-33. Ссылаться на свою статью
5. Fedorov A.V., Fedorova N.N., Vankova O.S., Tropin D.A., "Verification of kinetic schemes of hydrogen ignition and combustion in air," AIP Conference Proceedings 1939, pp. № 020019, (2018). (DOI: 10.1063/1.5027331)
6. Burrows M.C., Kurkov A.P., Analytical and experimental study of supersonic combustion of hydrogen in a vitiated airstream // TM X-2828, NASA, 1973
7. Evans J.S., Schexnayder C.J. Jr. Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames // AIAA Jour. Vol. 18, No. 2, 188-193.