

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАНАЛАХ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА

О.С. Ванькова^{1,2}, Н.Н. Федорова^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

³Новосибирский государственный архитектурно - строительный университет (СИБСТРИН), г. Новосибирск

Тема исследований связана с разработкой камеры сгорания перспективных летательных аппаратов, способных двигаться с гиперзвуковыми скоростями ($M=5-8$). После торможения в канале воздухозаборника воздух при скоростях $M=2-4$ поступает в камеру сгорания, где должно произойти его смешение с горючим и воспламенение [1, 2]. Однако высокие скорости потока и малые времена пребывания смеси в камере сгорания затрудняют процессы смешения и воспламенения. Поэтому исследования процессов смешения и воспламенения при сверхзвуковых скоростях актуальны.

Наиболее простой геометрической конфигурацией камеры сгорания является канал с расширением (уступом или каверной). Перед зоной расширения в канал подается топливо, а за уступом или в каверне организуется рециркуляционная зона, обеспечивающая необходимое для смешения и воспламенения время пребывания смеси.

В работе рассмотрены сверхзвуковые течения водородо-воздушной смеси в канале с каверной. Расчет проводится с помощью коммерческого пакета ANSYS CFD Fluent 15.0 [3]. Целью работы является тестирование вычислительной технологии и различных кинетических схем, а также изучения влияния угла подачи топлива на процессы смешения и самовоспламенения смеси.

На первом этапе проведено тестирование схем на экспериментальных данных [4] о воспламенении струи водорода. Рассматривались процессы смешения и самовоспламенения водородо-воздушной смеси, подаваемой соосно в сверхзвуковой поток. Начальные данные представлены в таблице.

	Водородная струя	Свободный поток
Число Маха, M	2.00	1.90
Температура, T_{st} , К	251	1495
Скорость, u , м/с	2432	1510
Давление, p_{st} , МПа	0.1	0.1
Массовая концентрация:		
H_2	1.000	0
O_2	0	0.241
N_2	0	0.478
H_2O	0	0.281

Для описания процесса воспламенения и горения водородно-воздушной смеси используется три кинетических схемы [5-7], которые были добавлены в расчетную схему ПК ANSYS Fluent. Геометрия тестовой конфигурации и расчетная область приведена на рис.1. В расчетной области под буквами обозначено: А – водородная струя, Б – стенка трубки, В – свободный поток, Г – стенка, Д – покоящийся поток. Цифрами обозначены характерные сечения, в которых в эксперименте измерялись полное давление (1, 3, 5, 7),

массовая концентрация H_2O (2, 4, 6, 8). Диаметр сечения сопла для подачи свободного потока $D=0.0653$ м, диаметр трубки для подачи струи водорода $d_j=0.009525$ м, толщина стенки трубки 0.0015 м. В невозмущенном потоке принимались стандартные атмосферные граничные условия: $P_0=101325$ Па, $T_0=300$ К, массовая концентрация $O_2 = 0.21$. На стенке трубки и стенке форсунки ставилось условие адиабатической стенки.

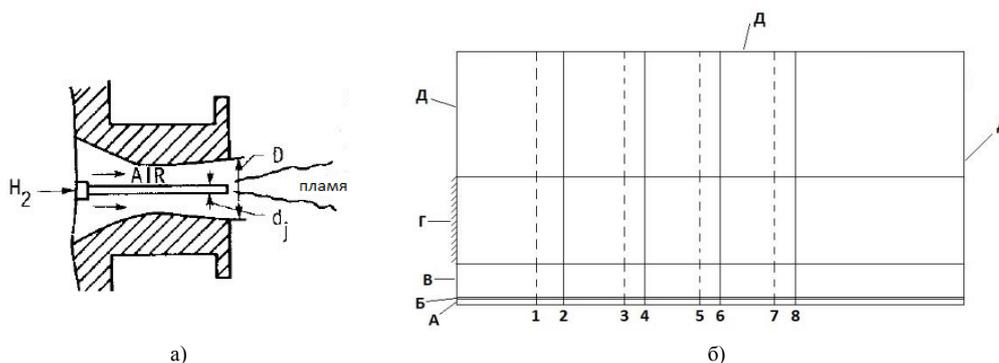


Рис.1 Геометрия тестовой задачи и расчетная область

Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными [4] по распределению давления и массовой концентрации H_2O в нескольких характерных сечениях. На рис. 2 представлены графики массовой концентрации H_2O в сечениях 2, 4, 6, 8.

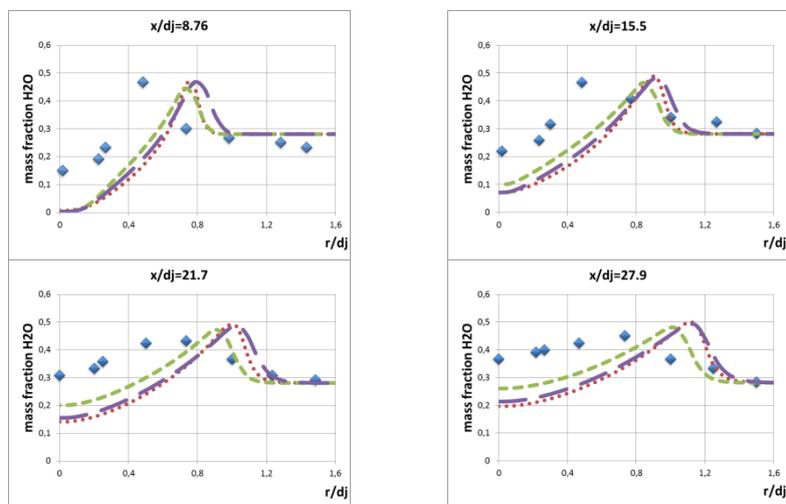


Рис.2 Массовая концентрация H_2O

◆ эксперимент ●●● расчет 8 реакций - - - расчет 19 реакций — расчет 25 реакций

Расчетные данные качественно совпадают с экспериментальными. Однако вблизи оси симметрии расчеты имеют количественное рассогласование с экспериментом. В частности, значения массовой концентрации H_2O в расчете ниже экспериментальных, а пики концентраций смешены по радиусу вверх. Причиной рассогласований может быть то, что в эксперименте перемешивание и воспламенение топлива и окислителя происходит выше по потоку. Кроме того, в связи с отсутствием данных о геометрии сопла рас-

четная область начиналась в его выходном течении, поэтому в расчетах не учтена неравномерность и коничность течения, а также пограничный слой на стенках сопла.

На рис.3 приведены графики распределения полного давления в сечениях 1, 3, 5, 7. Из графиков видно, что качественное совпадение расчетных данных с экспериментом наблюдается для всех реакций. Количественное совпадение удовлетворительно для расчета с 19 реакциями.

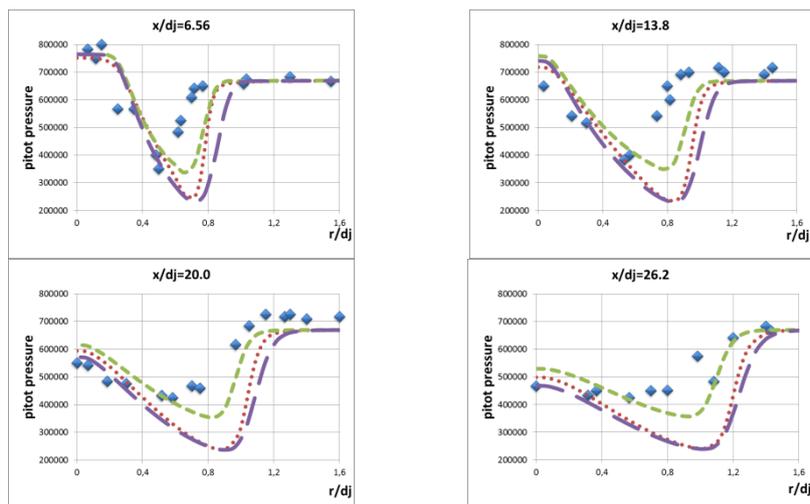


Рис. 3 Поле распределения полного давления

◆ эксперимент ···· расчет 8 реакций - - - расчет 19 реакций — расчет 25 реакций

На втором этапе выполнены параметрические расчетные исследования сверхзвукового воздушного течения в канале с каверной, перед которой в канал подается струя водорода. Геометрия канала и расчетная сетка приведены на рис. 4. Во входном сечении (1) в канал подается воздух при числе Маха $M=2.8$, давлении торможения $p_0 = 8,14 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения $T_0 = 1798$ К. Со стенки канала в точке А (см. рис. 4), находящейся на 50 мм выше по течению от уступа под углом $\alpha = 30^\circ, 60^\circ$ и 90° производится вдув водорода со звуковой скоростью при следующих параметрах: давление торможения $p_0 = 9 \cdot 10^5$ Па и температура $T_0 = 300$ К. На стенках канала (2) заданы условия прилипания для скорости и условия «холодной» стенки $T_w = 300$ К для температуры.

Были решены две задачи. В Задаче 1 пограничный слой на стенках канала был очень тонким, а во второй толщина пограничного слоя перед зоной выдува струи составляла 10 мм, что достигалось за счет увеличения длины канала на 817 мм перед точкой А. Начальные данные и граничные условия оставались прежними.

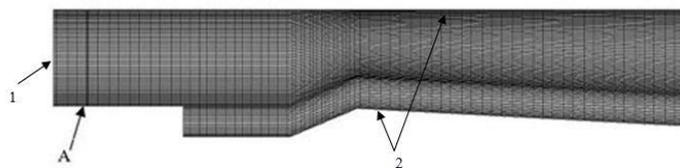


Рис.4 Геометрия и расчетная сетка канала с каверной

На рис.5 представлены поля распределения массовой концентрации H_2O в задаче 1. Рисунок показывает, что смесь воспламеняется сразу за зоной подачи струи водорода. Далее слой смешения и горения распространяется над каверной и далее вдоль нижней стенки канала. При подаче струи водорода под углом 90° процесс горения захватывает и каверну.

Анализ распределения концентраций H_2 (топливо) и O_2 (окислитель) показал, что над областью горения находится бедная смесь, много окислителя и недостаток топлива. В каверне находится богатая смесь, избыток топлива и недостаток окислителя. При подаче струи водорода под углом 90° достигается максимальная толщина зоны горения в выходном сечении.

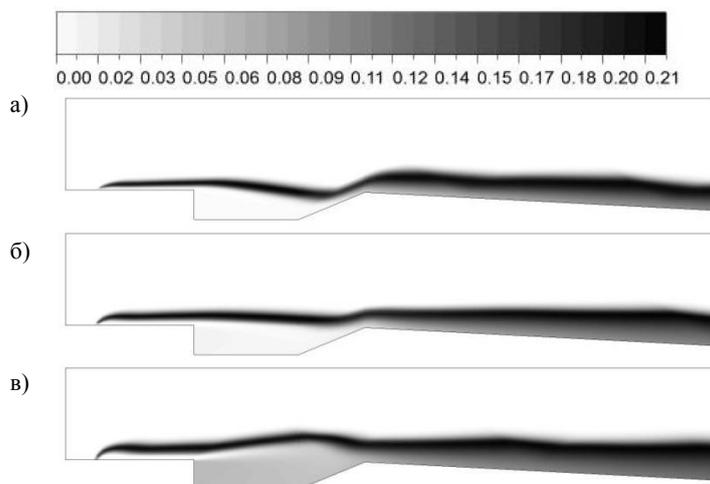


Рис.5 Массовая концентрация H_2O в задаче 1
а) 30° , б) 60° , в) 90°

На рис.6 представлено поле распределения массовой концентрации H_2O в задаче 2.

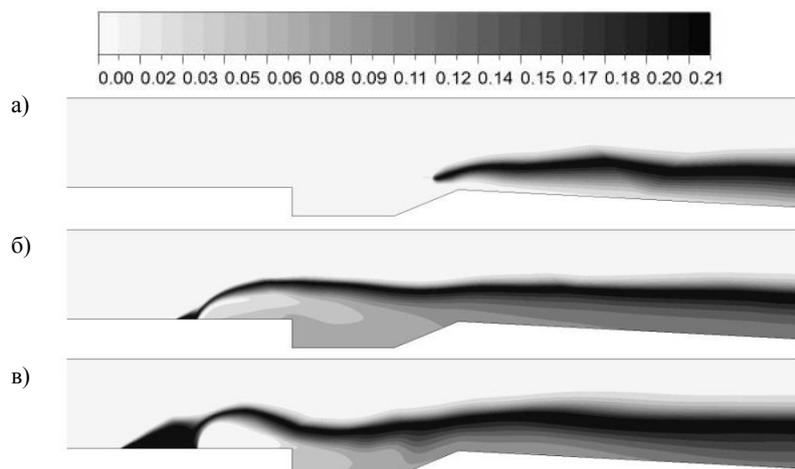


Рис.6 Массовая концентрация H_2O в задаче 2
а) 30° , б) 60° , в) 90°

В случае подачи струи водорода под углом 30° видно, что воспламенения смеси происходит в локальной дозвуковой области. Слой смешения и горения намного больше, чем при расчетах в канале с каверной без учета пограничного слоя (рис.5). В случае угла инъекции равном 60° и 90° процесс горения распространяется из зоны подачи струи водорода и захватывает каверну. Слой смешения и горения захватывает большую часть канала.

На рис.7 приведено число Маха в задаче 1.

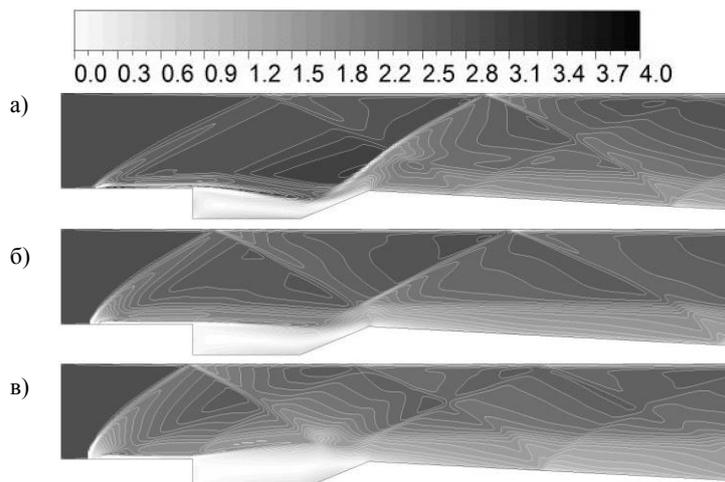


Рис.7 Число Маха в задаче 1
а) 30° , б) 60° , в) 90°

При угле инъекции 30° в канале видно образование двух систем скачков. Первый скачок образуется в зоне подачи струи водорода, затем он падает на верхнюю стенку, отражается от нее и потом последовательно отражается от стенок. Второй скачок образуется на задней стенке каверны, последовательно отражается от стенок канала.

При угле инъекции 60° скачок уплотнения образуется в зоне подачи струи водорода. Отражившись от верхней стенки, падает на слой смешения и объединяется с волной сжатия, формирующейся на задней стенке каверны.

При угле инъекции 90° образуется две системы скачков уплотнения. Первая система формируется в зоне выдува водорода. В этом случае она более интенсивна. Отражившись от верхней стенки скачок, приходит на слой смешения, что приводит к «вспуханию» слоя. Вторая система образуется вблизи передней кромке каверны и далее распространяется вниз по течению. За скачками уплотнения давление и температура в потоке повышаются, что обеспечивает условия для воспламенения и устойчивого горения смеси.

На рис.8 представлено число Маха в задаче 2.

При угле инъекции 30° можно видеть образование ударной волны в зоне выдува струи водорода. Далее скачок отражается от верхней стенки и падает на слой смешения, образуя дозвуковую область. Отражившись от слоя смешения, ударная волна направляется к верхней стенке. Здесь образуется «ножка» Маха. За ней образуется локальная дозвуковая область. На передней кромке каверны образуется волна разрежения.

В случаях с углом инъекции 60° и 90° ударная волна образуется до зоны выдува водородной струи. За скачком образуется локальная дозвуковая область, которая способствует лучшему воспламенения смеси. Локальные дозвуковые зоны более обширны. При

подаче водородной струи под углом 90° поток за каверной тормозится до дозвукового, о чем свидетельствует отсутствие скачков в канале за каверной.

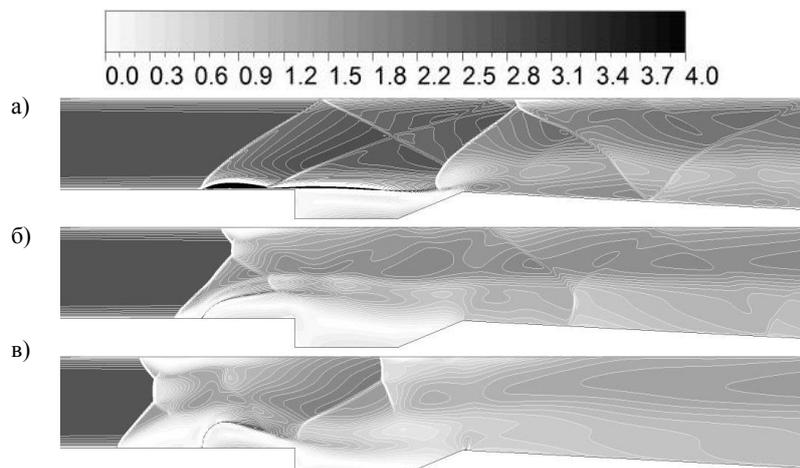


Рис.8 Число Маха в задаче 2
а) 30° , б) 60° , в) 90°

Исследования проведены при поддержке РФФИ, грант 13-08-00786 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. ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Том I/Колл. Авторы/Под общей научной редакцией В.А. Скибина, В.И. Соломина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2005. – 472 с. ISBN 5-94049-016-6
3. www.ansys.com
4. **John S. Evans and Charls J. Schexnayder Jr.** Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames // AIAA Jour. Vol. 18, No. 2, 188-193
5. **Chul Park** Review of Chemical-Kinetic Problems of Future NASA Missions, I: Earth Entries// Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 7, No. 3, July-Sept. 1993
6. **Foluso Ladeinde** A Critical Review of Scramjet Combustion Simulation (Invited). AIAA Paper, 209-127, 13 pp.
7. **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.