

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА И МЕТАНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГПВРД.

Использование стандартной к-ε модели турбулентности и упрощенной хим. кинетики не позволяют рассчитывать рабочий процесс в ГПВРД, так как нет достоверных параметров к-ε модели для условий сверхзвукового горения, а одна реакция недостаточна для описания процесса горения.

Поэтому цель проведения данной работы - оценка возможности использования программы OpenFOAM для проведения расчетов течения и горения водорода и метана в камере сгорания ГПВРД, с использованием детальной хим. кинетики и les модели турбулентности (модели больших вихрей).

В качестве экспериментальных данных для тестирования программы OpenFOAM использовались данные по горению газообразного водорода в экспериментальной камере сгорания ГПВРД.

Камера сгорания разборная, включающая в себя три модуля, стыкующиеся между собой с помощью фланцевых соединений:

- сопловой модуль, предназначенный для ускорения поступающего на его вход рабочего газа до сверхзвуковой скорости;
- пилонный модуль, который предназначен для ввода газообразного водорода в сверхзвуковой поток рабочего газа, организации смешения и горения водорода с рабочим газом;
- расширяющаяся камера сгорания, в которой завершается процесс сверхзвукового горения и ускоряются образовавшиеся продукты сгорания.

На Рис.1. представлен вид экспериментальной камеры.

Чтобы аккуратно организовать вход сверхзвукового потока на левой границе к расчетному объему на входе присоединен дополнительный объем.

За счет этого процесс обтекания пилон будет происходить в расчетной области, а не на ее границе.

В камере расположен центральный пилон, объединенный со вставкой, играющей роль разгонного сопла.

Сверху и снизу камеры также расположены верхний и нижний пилоны, представляющие половинки центрального пилон.

Центральный пилон делит поток на два, что позволяет рассматривать только одну половину потока. С учетом расположения рампов и отверстий подачи водорода в поток, расчетный объем уменьшается до 1/12 от объема экспериментальной камеры.

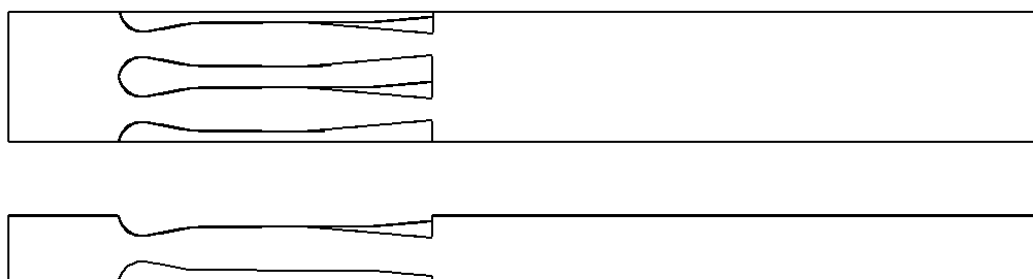


Рис.1. Полный контур камеры, вид сбоку (вверху). Контур расчетного объема (снизу).

На Рис.2. представлен перспективный вид расчетного объема. Расчетный объем заполнен шестигранными ячейками сетки. Размеры ячеек меньше там, где предполагаются большие градиенты скорости, температуры, концентрации компонентов. Число шестигранных ячеек сетки 29500.

Вход (inlet) и выход (outlet) для потока воздуха обозначены на Рис.2. На Рис.2. также представлены граничные области для вдува потока водорода. Каждое отверстие по площади представлялось поверхностями двух ячеек, желтые стрелки представляют вектор скорости водорода на входе в камеру. Вход водорода в камеру представлялся тем же типом граничных условий, как и вход воздуха. В данной работе не ставилась задача детального описания пристеночного турбулентного пограничного слоя, поэтому на верхней и на обоих боковых поверхностях расчетного объема

задавалось граничное условие - плоскость симметрии. На нижней поверхности расчетного объема и на поверхности пилона задано граничное условие – адиабатическая стенка со скольжением.

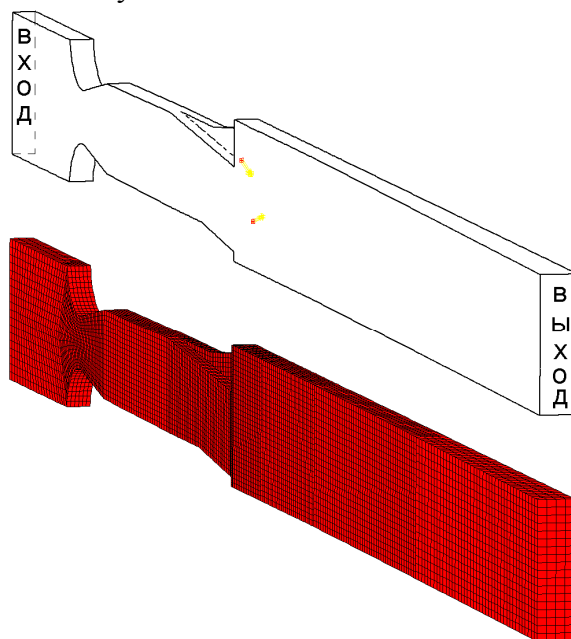


Рис.2. Расчетный объем и сетка.

Моделируемое испытание проводилось при полном давлении рабочего газа на входе в сопловой модуль  $P_r = 16$  бар и температуре рабочего газа -  $T_r = 1540$  К. Массовая концентрация кислорода в рабочем газе - 0.23. Расход газа через всю камеру - 2500 г/с. Весь расход водорода - 58.3 г/с.

Рассчитанная картина течения примерно соответствует наблюдаемой в экспериментах. При проходе через входное сопло поток воздуха разгоняется и становится сверхзвуковым. При вдуве газообразного водорода в поток и в результате его горения, образующийся газовый поток тормозится и за пилоном образуется большая область дозвукового течения. Таким образом, процесс стабилизации горения водорода происходит в дозвуковом потоке. Размер дозвуковой зоны определяется, в основном, геометрическими размерами пилона. Площадь поперечного сечения камеры сгорания, занятая сверхзвуковым потоком в этом месте не превышает 20% от площади камеры. Горение водорода, особенно в области расположенной сразу за пилоном, приводит к увеличению импульса потока и к созданию тяги двигателя. Геометрические и режимные параметры камеры и пилона влияют на эффективность горения водорода. В некоторых случаях изменение этих параметров может привести к срыву процесса горения, или переходу сверхзвукового течения в камере к дозвуковому. Далее, ближе к выходу из сопла газовый поток разгоняется, становится сверхзвуковым, и в выходном сечении число Маха достигает величины  $M=1.7$ .

Расчет процесса горения водорода проводился с les моделью турбулентности, а скорость хим. реакции определялась, как и в реакторе частичного перемешивания PASR, турбулентностью и хим. кинетикой (27 уравнений 9 компонента). Временная эволюция больших вихрей в том числе и турбулентной природы рассчитывается как часть общего решения, турбулентность, вызванная маленькими турбулентными вихрями, описывается уравнением переноса, подобным к-ε модели. Поэтому, чем меньше размер ячейки, тем точнее решение. Картина течения из-за крупных турбулентных вихрей нестационарная, поэтому для получения стационарного решения проводится усреднение.

В результате численного моделирования в различные моменты времени были получены распределение давления, температуры, скорости на границах расчетного объема. Расчеты показывают, как крупные структуры (вихри) формируются в зоне за рампами и переносятся вниз по потоку. Такое поведение крупных структур также прослеживается и на распределении концентраций основных компонентов.

На Рис.3. представлено распределение на границах расчетного объема усредненных по времени (по всем турбулентным вихрям за время 0,0025 секунд) давления, температуры, осевой скорости и

числа Маха. На Рис.4. представлено детально распределение границы  $Ma=1$  по пространству расчетного объема.

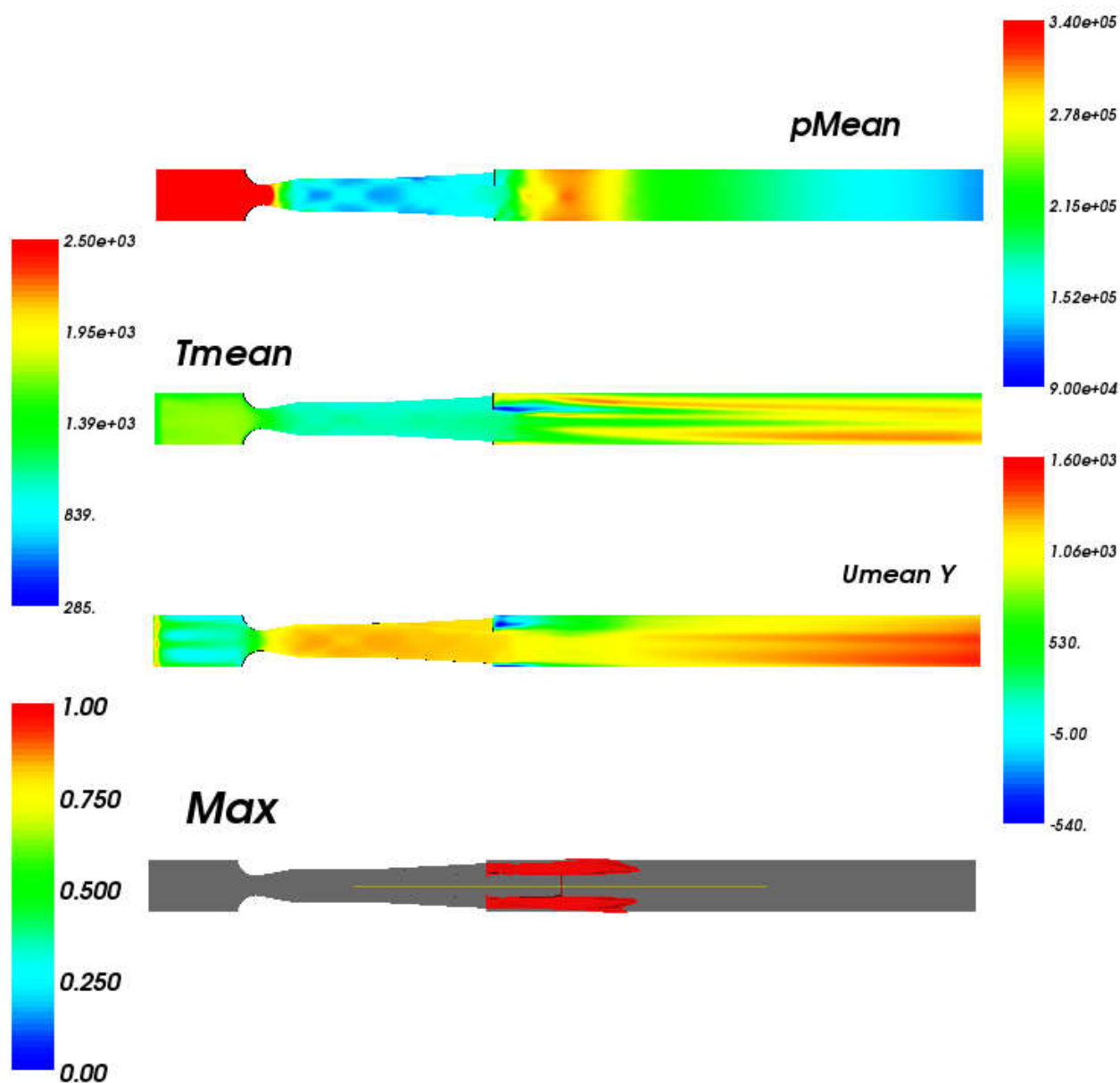


Рис.3. Распределение на границах расчетного объема усредненных давления, температуры, осевой скорости и границы области с числом Маха = 1.

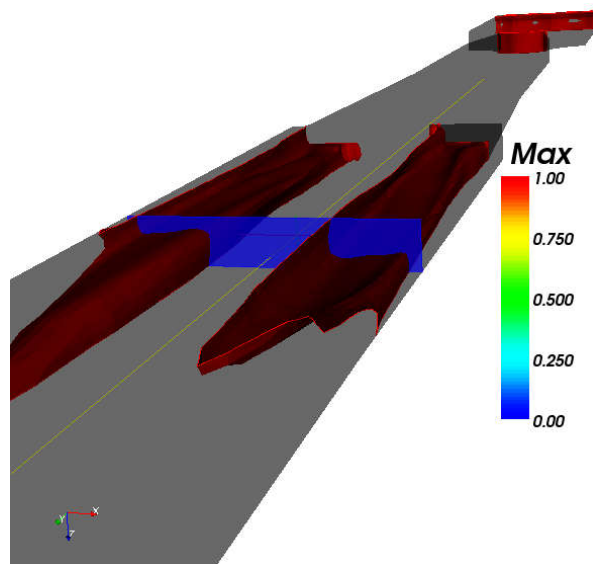


Рис.4. Распределение границы  $Ma=1$  по пространству расчетного объема.

На Рис.5. представлено экспериментальное и рассчитанное распределение статического давления на стенке камеры за пилонами вдоль оси симметрии. Распределения качественно совпадают. И в экспериментальных, и расчетных данных давление на стенке с увеличением расстояния от пилонов сначала возрастает, затем плавно уменьшается. Положение максимума при этом в расчетах и в экспериментах совпадает. Величина статического давления в экспериментах на входе из камеры составляет примерно 1.05 бар, тогда как в результате расчетов получена величина порядка 1.25 бар. Получается, что в расчетах выходной поток разогнался недостаточно.

Для получения более точного совпадения результатов расчетов с экспериментом необходимо проведение дополнительных мер. Одна из них - проведение расчетов на более мелкой сетке. Необходимо также более аккуратное описание пристеночной турбулентности, точное задание состава искусственного воздуха на входе в ГПВРД.

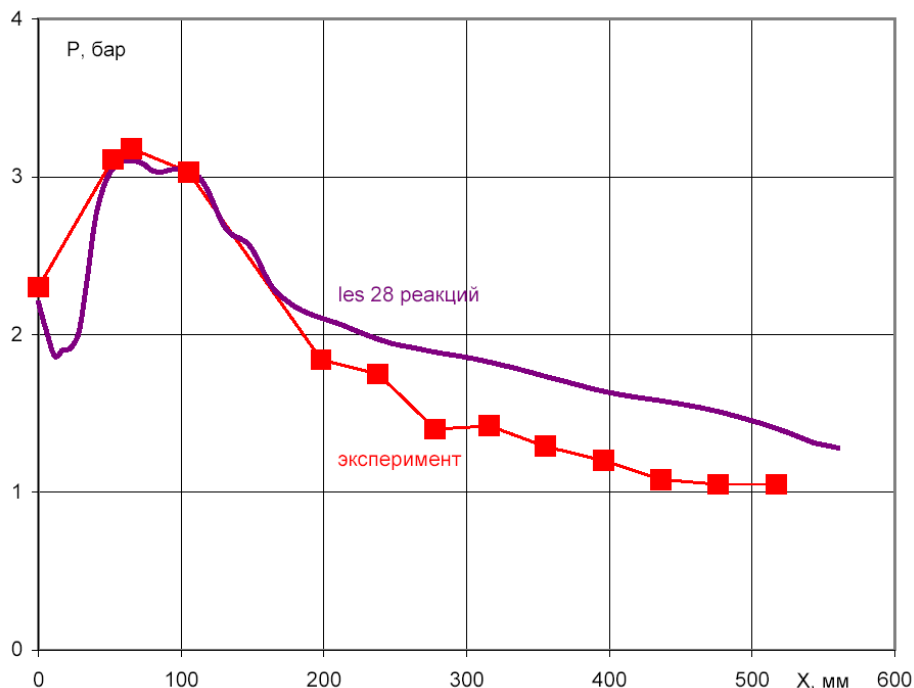


Рис.5. Рассчитанное и экспериментальное распределение статического давления на стенке камеры сгорания ГПВРД.

Численное моделирование горения метана в условиях камеры сгорания ГПВРД имеет смысл проводить только с детальным описанием химических реакций, так как у метана время задержки воспламенения значительно больше, чем у водорода. В данном случае горение метана описывалось детальной хим. кинетикой (325 уравнений 53 компонента).

Расчеты, как и в случае горения водорода, проводились на уменьшенном расчетном объеме, который составляет 1/12 часть объема камеры (несколько другой конструкции, чем при расчете горения водорода) и включает в себя половину рампы с половиной отверстия для подачи метана. Граничными условиями, как и в расчетах горения водорода, будет Inlet на входе воздуха и метана в камеру и Outlet на выходе из сопла камеры ГПВРД. Остальными граничными условиями будет стенка со скольжением и плоскость симметрии. Сетка для уменьшенного расчетного объема состоит из 35 тыс. шестигранных ячеек.

Картина течения принципиально отличается от случая горения водорода. Горение метана начинается примерно на расстоянии 350 мм от пилона. За счет тепловыделения в этой области образуется прямой скачок, на котором и происходит стабилизация горения метана. За прямым скачком образуется область дозвукового течения, которая перекрывает все проходное сечение камеры сгорания, и в которой, в основном, и происходит горение метана. За зоной горения поток разгоняется и снова становится сверхзвуковым.

На рисунках ниже представлены результаты расчетов поля давления, температуры, скорости, числа Маха (Рис.6.), размер дозвуковой зоны (Рис.7.), поля концентрации компонентов (Рис.8.).

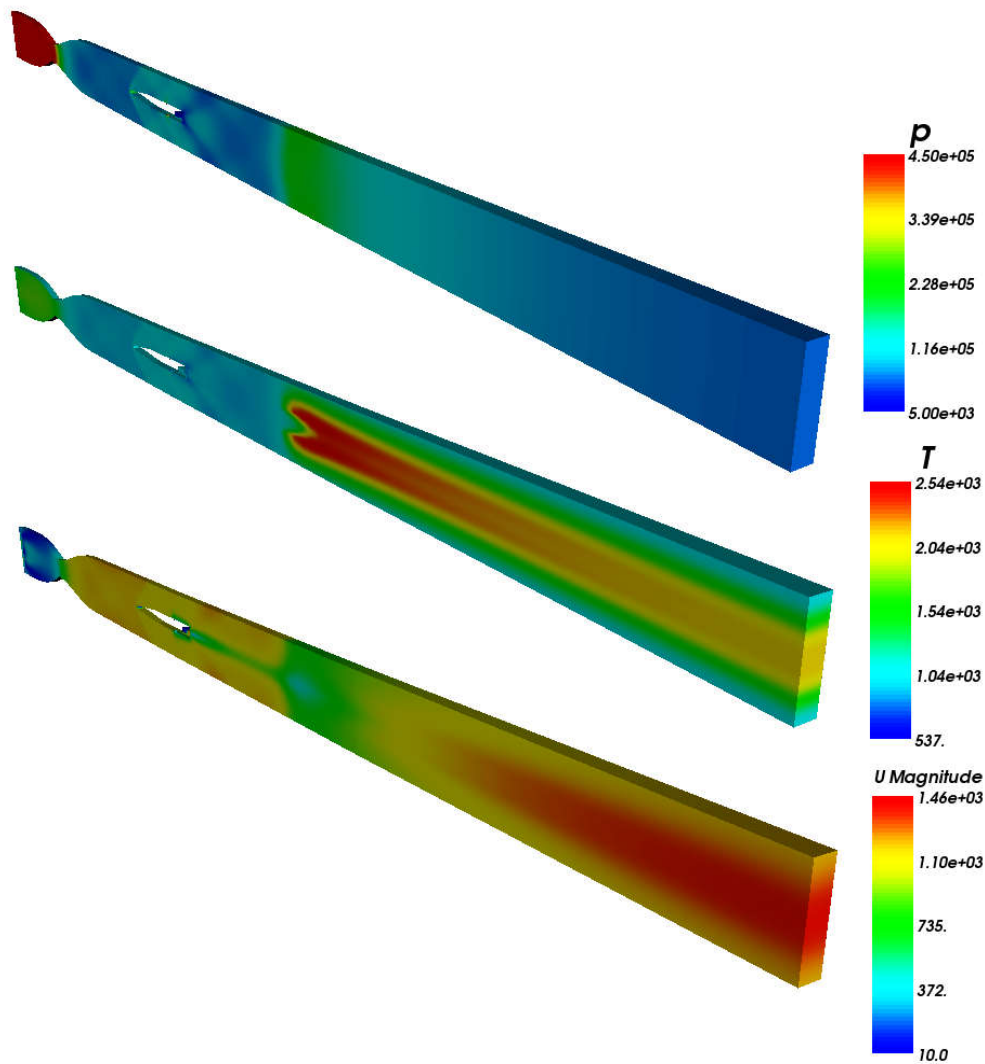


Рис.6. Распределение на границах расчетного объема статического давления, температуры, скорости.

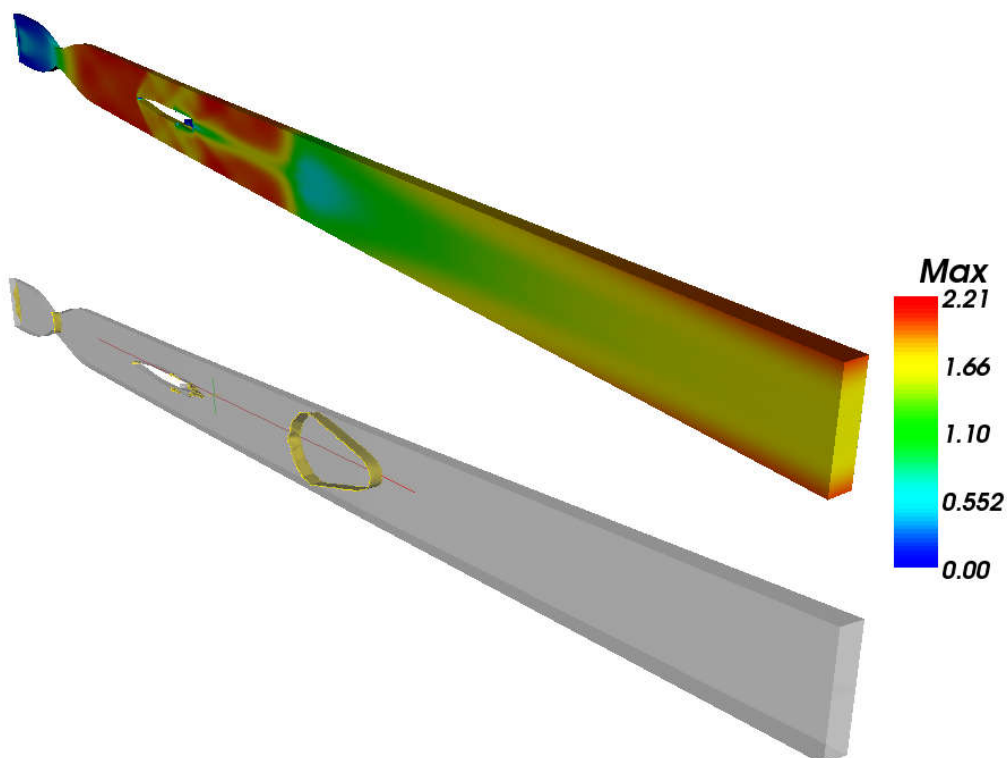


Рис.7. Распределение на границах расчетного объема числа Маха; граница дозвуковой зоны.



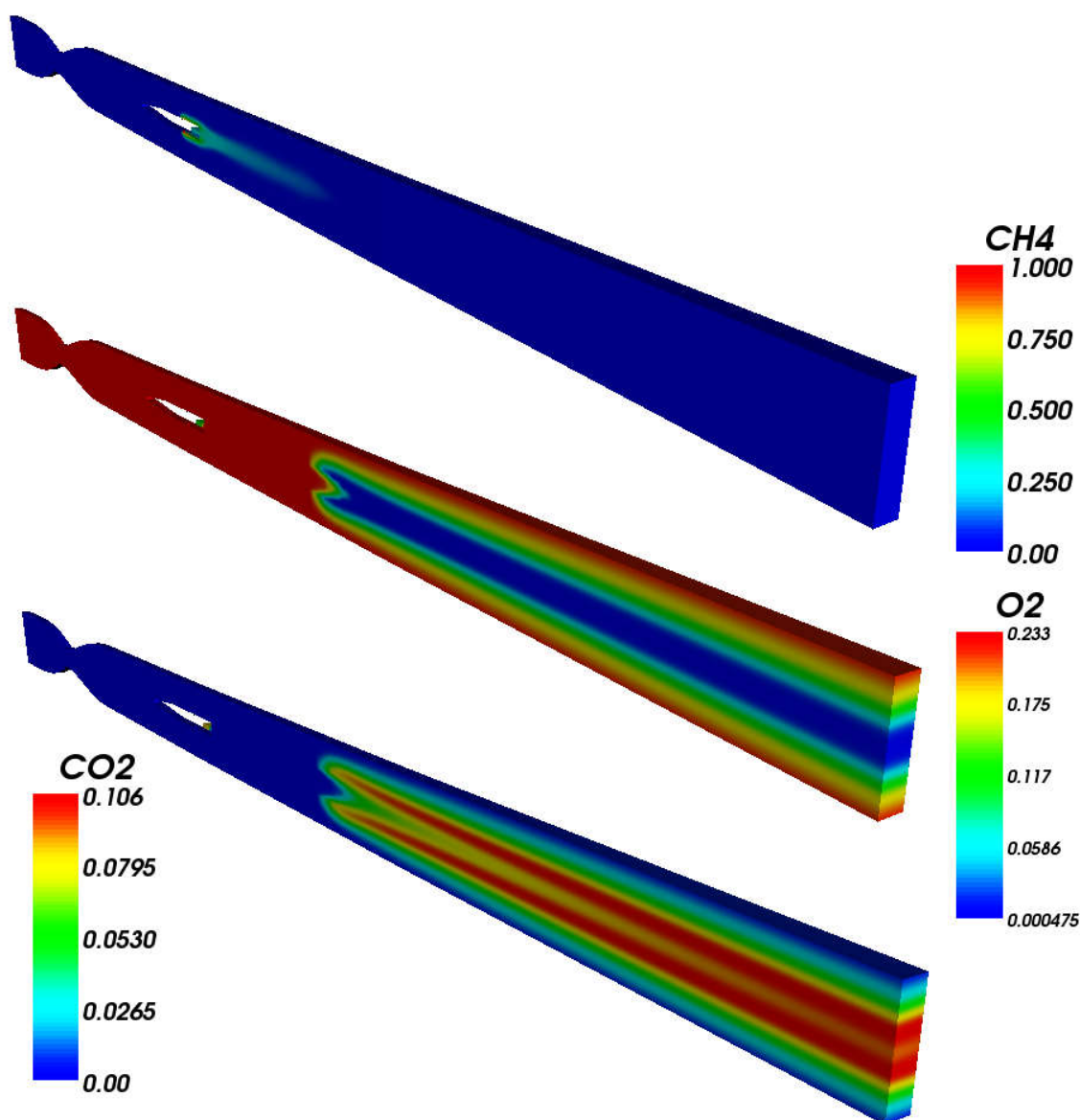


Рис.8. Распределение на границах расчетного объема концентрации основных компонентов.

## ВЫВОДЫ.

1. Рассчитанная картина течения и горения водорода в экспериментальной камере сгорания ГПВРД с использованием модели больших вихрей и с детальной (27 реакций, 9 компонентов) хим. кинетикой соответствует наблюдаемой в экспериментах. При проходе через входное сопло поток воздуха разгоняется и становится сверхзвуковым. При вдуве газообразного водорода в поток и в результате его горения, образующийся газовый поток тормозится, и за пилоном образуется большая область дозвукового течения в которой и происходит стабилизация процесса горения водорода. Далее, ближе к выходу из сопла газовый поток разгоняется, весь становится сверхзвуковым.
2. Рассчитанная картина течения и горения метана в камере сгорания ГПВРД с пилоном с использованием детальной хим. кинетики (325 уравнений, 53 компонента) дает совершенно другую картину процесса горения и стабилизации. Наблюдается отрыв зоны горения от пилон, стабилизация горения метана происходит за прямым скачком на расстоянии порядка 350 мм за пилоном. Горение метана происходит в дозвуковой зоне, которая перекрывает все проходное сечение камеры сгорания. Далее поток разгоняется и становится сверхзвуковым.