

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В.В. Рыжков, Е.А. Лапшин, И.И. Морозов, М.В. Силютин

**Моделирование рабочего процесса ЖРД
на топливе кислород-водород в среде ANSYS CFX**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

УДК: 681.3; 744(075)

Авторы: **Рыжков Владимир Васильевич,
Лапшин Евгений Александрович,
Морозов Илья Игоревич,
Силютин Максим Владимирович**

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор В.В. Бирюк

Рыжков, В.В. Моделирование рабочего процесса ЖРД на топливе кислород-водород в среде ANSYS CFX [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В.В. Рыжков, Е.А. Лапшин, И.И. Морозов, М.В. Силютин; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (10,6 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 или выше.

В пособии представлена технология численного моделирования рабочего процесса ЖРД на топливе кислород-водород, в качестве примера приведены результаты расчёта распределения газодинамических параметров продуктов сгорания в тракте ЖРД.

Полученные результаты могут быть использованы в научных и учебных целях.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

Содержание

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД НА ТОПЛИВЕ КИСЛОРОД-ВОДОРОД.....	8
1.1 ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ.....	8
1.2 СЕТКОГЕНЕРАЦИЯ.....	10
1.3 ПОДГОТОВКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ.....	23
1.4 МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ГОРЕНИЯ.....	28
1.5 ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА.....	31
1.6 ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ.....	33
2 РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ПРИМЕРА ПО РАСЧЕТУ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД НА ТОПЛИВЕ КИСЛОРОД-ВОДОРОД.....	39
2.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	40
2.2 СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ.....	42
2.3 КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	44
2.4 ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ (ПОЛНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ) ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ОБЛАСТИ СТЕНКИ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ.....	50
2.5 ТРАНСФОРМАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ И ПОЛНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДОЛЬ ТРАКТА КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ.....	52
2.6 ЭПЮРЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	52
2.7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВДОЛЬ ОСИ ДВИГАТЕЛЯ.....	78
2.8 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И КОНСТРУКЦИИ ЖРД НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	82

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	84
-------------------------------	----

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Сокращения

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;

РТ – рабочее тело.

Обозначения

I_y – удельный импульс тяги, м/с;

K_m – массовое соотношение компонентов топлива;

L_{np} – приведенная длина камеры сгорания, м;

M, m – масса, кг;

$\dot{m}$ – массовый расход, г/с;

P – тяга двигателя, Н;

ρ – плотность, кг/м³;

p – давление, Па;

T – температура, К;

V, U – скорость и осевая составляющая скорости, м/с;

τ – время, с;

x, y, z – декартовы координаты, м.

Индексы

г – газ;

г – горючее;

ок – окислитель;

max – максимальный;

min – минимальный;

РТ – рабочее тело;

ПС – продукты сгорания;

ст – стенка;

доп – допустимое значение параметра.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе проектирования объектов ракетно-космической техники одной из основных проблем является создание жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) различной размерности и назначения. ЖРД используются в составе ракет тяжелого, среднего и легкого классов для выведения полезной нагрузки на околоземную орбиту, в двигательных установках управления разгонными блоками, орбитальными и межпланетными станциями, космическими аппаратами и т.д.

Для любых ЖРД актуальным является распределение газодинамических параметров в трактах, определяющих совершенство рабочих процессов в камере сгорания и сопле, влияющих на тепловое состояние конструкции и формирующих основные (энергетические) характеристики ракетных двигателей.

До последнего времени большинство задач при создании ЖРД решались, в основном, экспериментальным методом, сопровождающимся рядом трудностей технического характера, связанного с необходимостью имитации эксплуатационных условий, высокой трудоемкостью по созданию объектов, экспериментальных стендов, установок и, таким образом, высокой стоимостью экспериментальной инфраструктуры; отработка двигателей длится значительный период времени (до 7...10 лет); получаемая информация имеет понятные ограничения (исследования проводятся не во всей области изменения определенных параметров); в результате, как правило, определяются только интегральные характеристики и т.д.

В связи с этим, все большее значение приобретают численные методы исследования для решения ряда задач, способствующие сокращению сроков создания двигателей, повышению качества проектирования и снижению объемов экспериментальной отработки.

При этом экспериментальные методы по-прежнему являются необходимыми и значимыми, но могут становиться средством для

формирования исходных данных численного эксперимента и средством верификации получаемых результатов.

Численные методы являются содержательной частью раздела вычислительной газовой динамики (ВГД) но, поскольку, методы ВГД, связаны с численным исследованием физических задач, они подвержены влиянию дополнительных специфических факторов, отсутствующих при физическом моделировании, таких как, замена непрерывной области дискретной, замещение дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы, системой алгебраических уравнений, использовании при этом ряда ограничений и допущений и т.д. Однако, с физической задачей они связаны через расчетную область, начальные и граничные условия.

При этом численные методы не позволяют получить новые знания и не избавляют от необходимости решения проблем газовой динамики. В частности, моделирования эффектов двухфазности, турбулентности, горения и ряда других.

Но поскольку, вычислительная газовая динамика является в настоящее время наиболее развивающимся разделом газовой динамики целесообразно её использование при решении инженерных задач в области создания ракетно-космической техники.

Перспективным направлением является также интеграция результатов численных методов в систему компьютерного проектирования (решения предпроектных задач).

В работе используется компьютерная среда Ansys CFX с CFX tascflow – интегрированной системой программного обеспечения для решения стационарного пространственного потока рабочего тела в тракте жидкостного ракетного двигателя на топлива кислород-водород.

1. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД НА ТОПЛИВЕ КИСЛОРОД-ВОДОРОД

1.1 ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ

Базовые уравнения сохранения записаны в форме в соответствии с [1].
Уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0, \quad (1.1)$$

где: U_j – j -я составляющая компонента вектора скорости, $j = \{x, y, z\}$,
 ρ – плотность,
 t – время.

Уравнение сохранения импульса (ρU_j):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i. \quad (1.2)$$

Здесь – в правой части уравнения x_i – компоненты сил давления p , тензора напряжения сил вязкости τ_{ij} , и массовых сил f_i

Тензор напряжения:

$$\tau_{ij} = -\mu_b \delta_{ij} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

где $\mu_b = 2/3 \mu$ – молекулярная вязкость, μ – динамическая вязкость, и δ_{ij} представляют индексы Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ когда $i=j$ и $\delta_{ij} = 0$ когда $i \neq j$).

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h) = \frac{\partial P}{\partial t} + U_j \frac{\partial P}{\partial x_j} - \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial Q_j}{\partial x_j}, \quad (1.3)$$

здесь h – теплосодержание, Q – количество тепла, прошедшего теплопроводностью;

запишем:

$$Q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

$$h = c_p T,$$

где: c_p – теплопроводность при постоянном давлении.

Уравнения сохранения энергии могут быть получены следующим образом:

производная по времени + конвективная составляющая = теплопроводность
+ работа сил давления
+ работа сил вязкости
+ турбулентные потоки высокой температуры
+ дополнительные условия

Различные формы записи уравнения сохранения энергии сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 - Сравнение различных форм записи уравнения сохранения энергии.

	Пример	Favre-усредненный Сжимаемый	
		M < 0.3	M > 0.3
Производная по времени	$\frac{\partial}{\partial t} \rho H$	$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho} \bar{H}$	
Конвективная составляющая	$\frac{\partial}{\partial x_j} \rho U_j H$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{\rho} \bar{\vartheta}_j \bar{H}$	
Теплопроводность	$-\frac{\partial Q_j}{\partial x_j}$	$-\frac{\partial \bar{Q}_j}{\partial x_j}$	
Работа сил давления	$\frac{\partial P}{\partial t}$	-	$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t}$
Работа сил вязкости	$-\frac{\partial}{\partial x_j} U_i \tau_{ij}$	-	$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\vartheta}_i \bar{\tau}_{ij} + \overline{u_i' \tau_{ij}'} \right)$
Турбулентные течения	-	$-\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\rho u_j' H'}$	
Дополнительные условия	-	$-\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{\vartheta}_j \overline{\rho u_i' u_j'}$ $-\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{\rho u_j' u_i' u_i'} \right)$	

Уравнения сохранения концентрации компонентов:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pC) + \frac{\partial}{\partial x_j}(pU_j C) = -\frac{\partial J_j}{\partial x_j} + R,$$

здесь c – концентрация компонентов, J_i – масса вещества переносимая посредством диффузии:

$$J_j = -D \frac{\partial C}{\partial x_j}.$$

Для моделирования турбулентности применена модель на основе напряжений Рейнольдса (RSM), модифицированная под «закон стенки» для структуры потока и тепломассообмена в пристенной области.

Выбрана диффузионная модель горения (EDM) с простой химической реакцией, когда лимитирующей является скорость смешения компонентов топлива по сравнению со скоростью протекания химической реакции. Эффективные числа Прандля и Шмидта приняты равными единице.

Теплообмен на стенке камеры двигателя соответствует условиям непроницаемости, стенки не реагирующие и адиабатные.

1.2 СЕТКОГЕНЕРАЦИЯ

Программный пакет ANSYS CFX включает три программных модуля:

- 1 препроцессор CFX-Pre;
- 2 решатель CFX-Solver;
- 3 постпроцессор CFD-Post.

В препроцессоре CFX формируется модель, которая состоит из проточной части, граничных условий подвода компонентов и выхода продуктов из сопла, выбирается тип анализа: стационарный или нестационарный, указываются начальные условия расчета, его длительность, тип, число и свойства взаимодействующих веществ.

Создание качественной расчетной сетки – это 80% решения задачи. С появлением доступных суперкомпьютеров вопрос качества сетки со

временем, несомненно, отойдёт на второй план, поскольку можно будет задавать заведомо мелкую сетку на всей расчётной зоне, не принимая в расчёт производительность вычислительной техники. При решении же на персональном компьютере вопрос качественной и одновременно не слишком ресурсоемкой расчётной сетки ещё долго будет актуален. Самым главным критерием качества сетки служит сравнение результатов, полученного на ней решения, с эталоном. Эталон может служить результат эксперимента, аналитическое решение, либо решение, полученное на заведомо мелкой сетке. Однако, если нет ни того, ни другого, ни третьего, рекомендуется поступать так: сначала решать на грубой сетке, а затем раз за разом её измельчать, до тех пор, пока результаты двух соседних решений не станут одинаковыми, то есть пока не исчезнет *зависимость решения от размеров ячеек* сетки. Этот метод хорош ещё и тем, что не требует длительных затрат времени для первого этапа решения задачи, ведь на нём выявляются все ошибки моделирования данного процесса, инженер набирается опыта решения конкретной задачи и быстро «отшлифовывает» модель. А экстенсивные операции измельчения сетки и получения набора результатов остаются «на потом», поскольку они длительные по времени, но практически не требуют квалификации. В работе будем рассматривать решения всех задач на очень грубой сетке, что позволит получить навыки работы в CFD-программе, не затрачивая много времени на многочасовое созерцание окна расчёта. Рекомендации же по проведению расчёта на мелкой сетке будут приведены в конце.

Проведение численного анализа производится в несколько этапов:

1 Создание трехмерной модели проточной части.

Обычно тракт ракетного двигателя имеет сложную форму, моделирование которой с помощью средств сеткогенераторов ICEM CFD или GAMBIT представляет большую сложность. Поэтому трехмерную модель тракта проще создать либо с помощью встроенных

средств ANSYS: ANSYS DesignModeler либо ANSYS SpaceClaim, либо с помощью внешних мощных CAD-пакетов.

2 Перед импортом трехмерной модели необходимо сделать выбор, с помощью какого сеткогенератора, необходимо создать сетку. В программных продуктах ANSYS имеется два мощных сеткогенератора ANSYS Meshing и ANSYS ICEM CFD, а также есть развивающийся перспективный продукт ANSYS Extended Meshing.

С помощью ПО ANSYS Meshing возможно использовать следующие методы построения сетки:

- Автоматическое построение сетки
- Тетра-сетки и гибридные сетки
- Гекса-сетки и сетки с преобладанием гекса-элементов
- Декартова усеченная сетка (метод CutCell)
- 2D сетки

Отличительной особенностью ANSYS ICEM CFD от ANSYS Meshing являются возможность создания блочно-структурированной сетки и наличие мощных средств проверки качества сетки и ее ручного редактирования и в настоящее время он является самым мощным продуктом по созданию сетки в линейке продуктов ANSYS.

Единственным недостатком ANSYS ICEM CFD является отсутствие интеграции с ANSYS Workbench, но это связано с тем что многие его функции перейдут в ANSYS Extended Meshing.

3 Импортирование трехмерной модели в сеткогенератор ANSYS ICEM CFD или Meshing.

Трехмерная модель из CAD-пакетов может передаваться в ANSYS ICEM CFD в формате Parasolid, IGES, STEP, STL и др. универсальным простым форматам передачи данных, по которым обычно эффективно и быстро передают данные из CAD-систем в CAE-средства для анализа. Недостатком передачи данных по

универсальным форматам передачи данных является потеря дерева проекта создания 3D. Либо возможно передать трехмерную модель по прямым интерфейсам к CAD-пакетам, которые есть в наличии у ПО ANSYS.

4 Перед созданием расчетной сетки перед расчетчиком всегда встает выбор, на каком методе остановится при создании расчетной сетки. При решении этого вопроса необходимо найти сбалансированное решение между быстротой получения результата и его качеством. Обычно, при решении этого вопроса опираются на следующие критерии:

- 1 цели и сроки сдачи расчета;
- 2 наличие аппаратных компьютерных ресурсов;
- 3 возможности и производительность программного средства для сеткогенерации;
- 4 знания и опыт инженера-расчетчика.

Исходя из этих критериев возможно выбрать тот метод создания сетки, который наиболее подходит для решения конкретной задачи.

Наиболее простым и широко используемым способом является применение методов создания тетра-сетки. Преимуществом этого метода является быстрота создания сетки, а недостатком метода являются ошибки расчета, возникающие из-за схемной вязкости, когда узлы элементов не совпадают с линиями движения потока.

Применение блочно-структурированной сетки, позволяет существенно уменьшить схемную вязкость и повысить точность получаемых результатов. Недостатком этого метода является сложность процесса построения блочно-структурированной сетки, применение которого требует опыта.

Наиболее оптимальным вариантом является применение тетра-сетки с призматическими слоями.

Если стоит задача применения прямого численного моделирования (*DNS*) то требуется чрезвычайно мелкая сетка, достаточная для разрешения вихрей наименьших масштабов. Согласно работам [3,6] для разрешения турбулентного течения необходима сетка в 10 узлов по каждому направлению для каждого турбулентного вихря (на 1 см³ при числе Рейнольдса 1×10^4 приходится примерно 10⁶ турбулентных вихрей).

5 После создания расчетной сетки необходимо проверить ее качество мощными средствами проверки, которыми обладает ANSYS ICEM CFD.

Оценка качества сетки производится по следующим параметрам:

- 1 Duplicate Elements (Сдвоенные элементы): Элементы, которые имеют все сдвоенные узлы с соседними элементами того же типа.
- 2 Uncovered Faces (Отсутствие поверхностей элемента): поверхности объемных элементов, которые не закреплены к поверхностям примыкающих элементов.
- 3 Missing Internal Faces (Отсутствие внутренних поверхностей элемента): объемные элементы близко расположенные к другим частям с не поверхностными элементами между ними.
- 4 Periodic Problems (Проблемы периодичности): несоответствие чисел узлов/поверхностей элементов между периодическими частями.
- 5 Volume Orientation (Ориентация объема): левонаправленные элементы имеющие некорректное соединение с др. элементами (неверная нумерация узлов элементов).
- 6 Surface Orientations (Ориентация поверхностей): объемные элементы которые перекрываются с несколькими поверхностными элементами (перекрывание, наложение).
- 7 Hanging Elements (Подвешенные элементы): линейные элементы имеющие свободные узлы (узлы не соединены с соседними элементами).

- 8 Penetrating Elements (Взаимопроникающие элементы):
поверхностные элементы которые взаимодействуют или пересекаются с другими поверхностными элементами.
 - 9 Disconnected Bar Elements (Разъединенные полосы элементов):
полосы элементов, где узлы не присоединены к узлам другой полосы элементов.
 - 10 Multiple Edges (множественные ребра): поверхностные элементы имеющие ребро которое принадлежит трем или более элементам.
 - 11 Triangle Boxes (набор треугольников): группа из 4 треугольников которая сформировала тетраэдр с несуществующим объемным элементом внутри.
 - 12 2 -Single Edges (2 свободных ребра): поверхностные элементы с двумя свободными ребрами (not shared by another surface element).
 - 13 Single-Multiple Edges: поверхностные элементы имеющие и свободные и множественные ребра.
 - 14 Stand-Alone Surface Mesh: поверхностные элементы не имеющие связей с поверхностями объемных элементов.
 - 15 Single Edges: поверхностные элементы имеющие свободные ребра.
 - 16 Delaunay Violation: треугольные элементы, узлы которых находятся внутри сферы описанной вокруг ближайшего элемента.
 - 17 Overlapping Elements (накладывающиеся друг на друга элементы):
continuous set of surface elements that occupy the same surface area
(surface mesh that folds on to itself).
 - 18 Non-manifold vertices (не связанные вершины): вершины внешних ребер близлежащих элементов не образуют замкнутого контура
 - 19 Unconnected Vertices (не присоединенные вершины).
- 6 Созданную сетку импортируют в препроцессор ANSYS CFX, в котором производится выбор типа анализа: стационарный, нестационарный; накладываются граничные условий входа Inlet и выхода Outlet;

выставляются начальные условия расчета; выбирается схемы дискретизации конвективных членов уравнений и шаг по времени.

Далее созданная модель передается на решение.

В решателе подготовленная модель проходит длительный процесс *нивелирования невязок* (т.е. падение невязок до достаточно низкого уровня и выход на постоянные значения). Полученное в итоге численное решение уравнений Навье-Стокса удовлетворяет всем условиям, заданным в препроцессоре. Если условия и модели были заданы правильно, эти значения в идеале соответствуют тем же параметрам, которые могут быть получены, например, в физическом эксперименте, проведенном с точно такими же условиями. Поэтому CFD-моделирование также иногда называют *численным экспериментом* (т.к. решение уравнений Навье-Стокса производится численно).

В постпроцессоре производится анализ результатов, полученных в решателе: построение полей распределения скалярных параметров и векторных полей, построение графиков, получение числовых значений точечных и осредненных параметров, создание и просмотр видео нестационарных процессов и т.д.

На рисунке 1.1 представлена двумерная модель проточной части канала изменяющегося сечения и его конечно-элементная сетка трёх видов: грубая, с размером ячеек 10 мм, мелкая с размером ячеек 3 мм и сетка с переменным размером ячеек, имеющая мелкие ячейки только в областях, где предполагается наличие высоких градиентов параметров. Можно видеть, что результат решения на сетке из элементов разного размера мало отличается от результата, полученного на мелкой сетке, однако время расчёта гораздо меньше за счёт отсутствия множества «ненужных» ячеек. Еще лучших результатов можно было бы добиться адаптивным измельчением сетки вдоль слоев смещения.

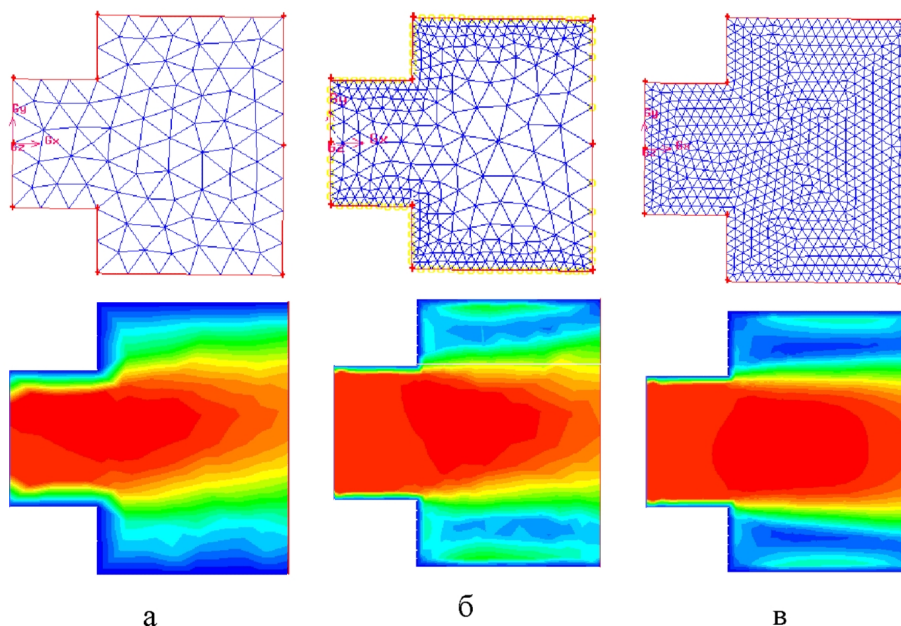


Рисунок. 1.1. - Расчётные сетки и полученные на них поля скоростей:
а - грубая сетка, б – сетка с переменным размером ячеек, в - мелкая сетка

На примере мы рассмотрим создание расчетной сетки для проведения анализа течения в тракте ЖРД тягой 100 Н с кислородным охлаждением стенки.

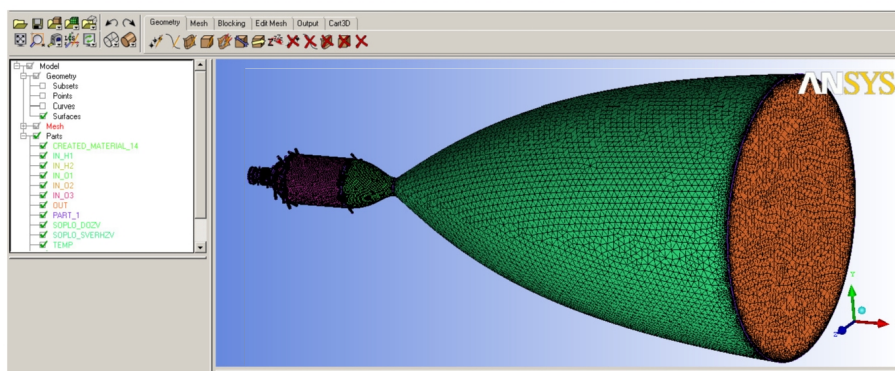


Рисунок 1.2 – Рабочее окно

При запуске ICEM CFD появляется его рабочее окно (рисунок 1.2). В нём можно видеть основные рабочие инструменты. Модель отображается в окне визуализации, это основное поле экрана. Также можно видеть главное меню и меню команд, с конкретными пунктами которых познакомимся позже, в процессе работы. Под окном визуализации расположено окно

статистики, куда выводится вся информация о выполненных действиях, в том числе сообщения об ошибках и предупреждения.

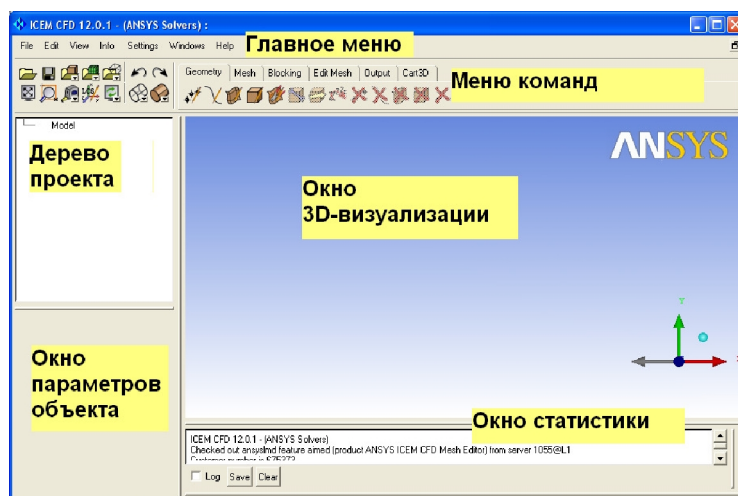


Рисунок 1.3 - Окно ICEM CFD

Создание расчетной сетки начинается с импорта трехмерной геометрии сделанной в CAD-пакете в среду ANSYS ICEM CFD через передачу по формату Parasolid.

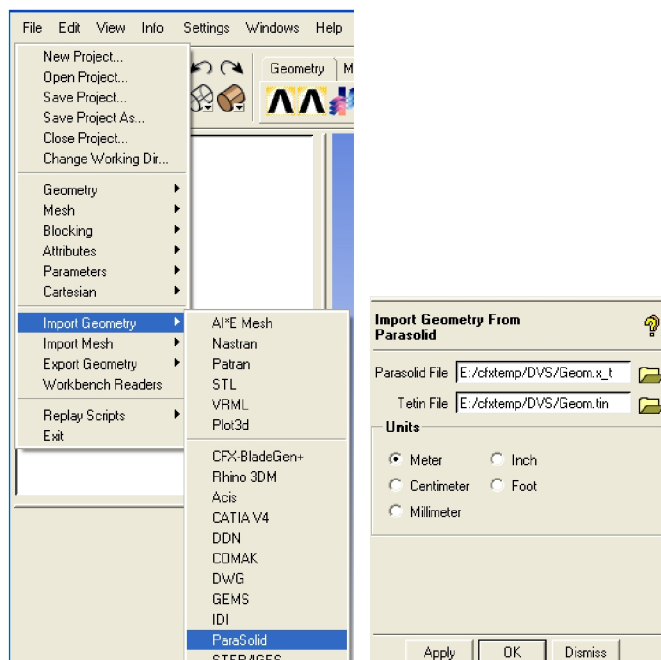


Рисунок 1.4 - Импорт геометрии в ICEM CFD

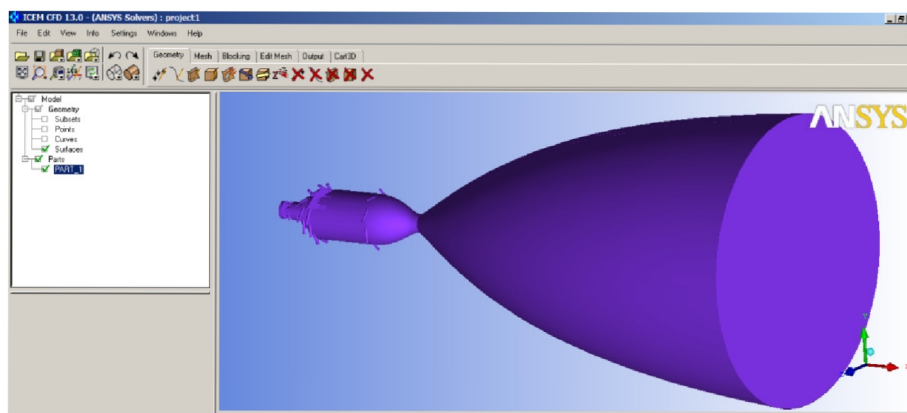


Рисунок 1.5 – Импортированная геометрия в среду ICEM CFD

После импорта геометрии проверим ее качество и создадим группы PARTS.

Чтобы создать эти группы в соответствии с расчётной моделью (рисунок 1.2), нужно нажать правой кнопкой в списке групп **Parts** (части) и в появившемся контекстном меню выбрать первый пункт **Create Part** (Создать часть) (рисунок 1.6). В появившемся меню нужно ввести название новой группы и нажать **Select**. Чтобы это делать было проще, и под курсор не попадали ненужные сейчас точки, линии и тела, можно отключить их отображение, сняв галочки с пунктов **Points**, **Curves** и **Bodies** в меню **Geometry** в дереве проекта. Теперь отображаться и выделяться будут только поверхности.

Кроме того, при выделении иногда нужно удобнее повернуть модель. Чтобы переключать режимы выбора и вращения нужно использовать кнопку **Toggle Dynamics** (Динамическое переключение) или клавишу **F9**. Если какой-то объект был выделен ошибочно, то отменить выделение можно, нажав на объекте той же левой кнопкой мыши, но с нажатой клавишей **Shift**. После выделения двух нужных поверхностей нужно нажать **Done** (среднюю кнопку мыши), а затем **Dismiss**, чтобы закрыть окно **Create Part**.

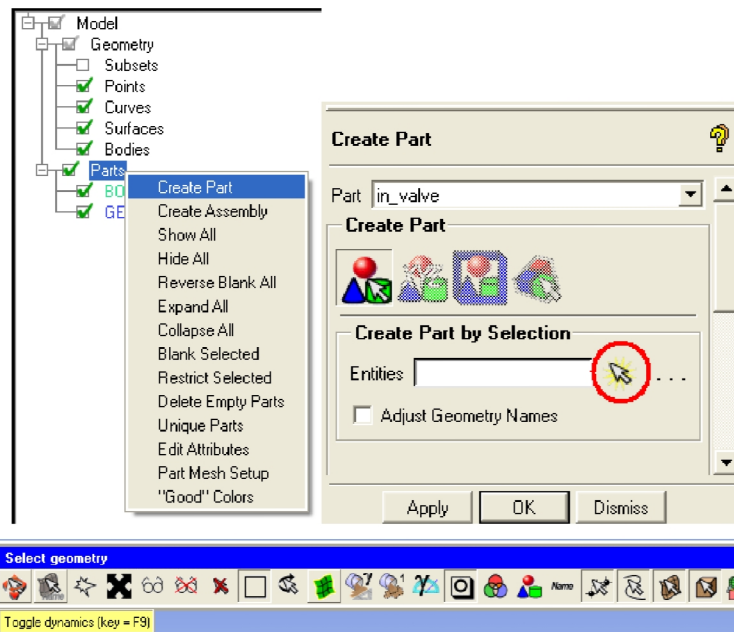


Рисунок 1.6 - Создание PARTS

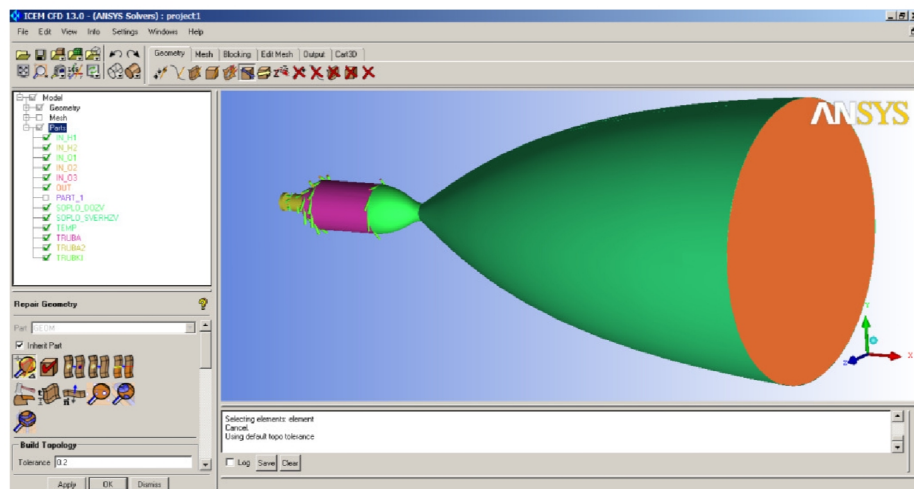


Рисунок 1.7 – Выделение поверхности

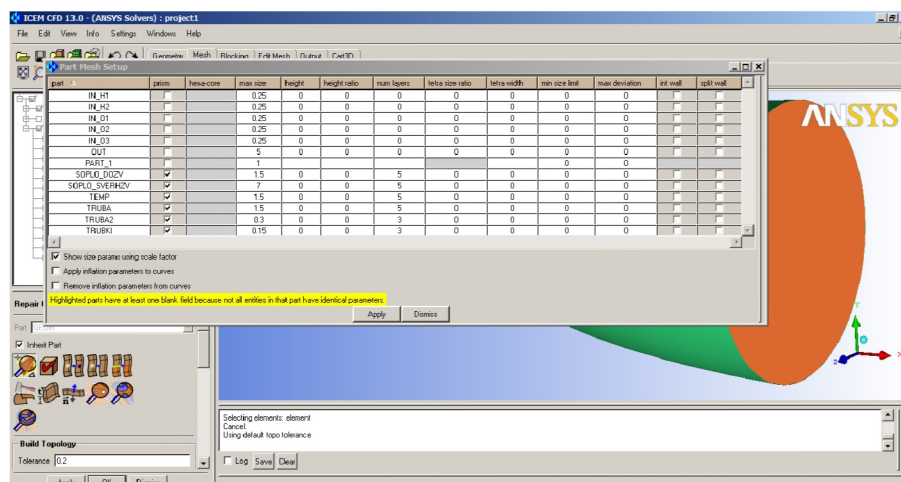


Рисунок 1.8 – Вкладка меню

Настройки Part Mesh Setup:

Maximum element size/Element size. Максимальный размер элемента.

Height. Высота первого элемента, по нормали. Только для Hexa и Prism

Height Ratio. Коэффициент роста для Prism или Hex

Number of layers. Количество слоев для Tetra prism. Размер берется от поверхности

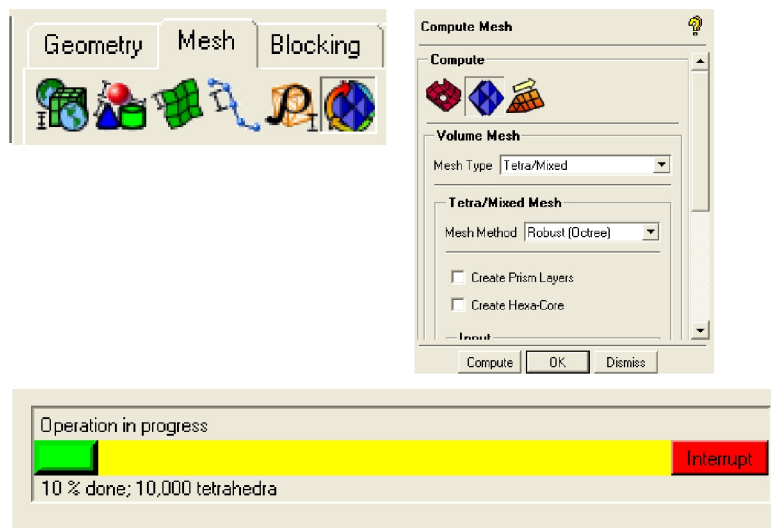
Tetra Size Ratio. Средний рост для tetra от объекта

Minimum Size. Наименьший размер элемента на поверхности

Ограничивает автоматическое разделение

Теперь необходимо создать расчётную сетку. Для этого открываем вкладку меню **Mesh** (Сетка), а там – **Compute Mesh** (рассчитать сетку) (рисунок 1.8). В появившемся меню можно оставить всё по умолчанию и нажать **Compute** (Рассчитать) или **ОК**. При этом начнётся процесс создания сетки. Он занимает некоторое время, при этом в правом нижнем углу экрана отображается статус процесса в виде зелёно-жёлтой полосы процесса.

После создания сетки можно будет её увидеть, если включить отображение всех **Parts** галочками в дереве проекта.



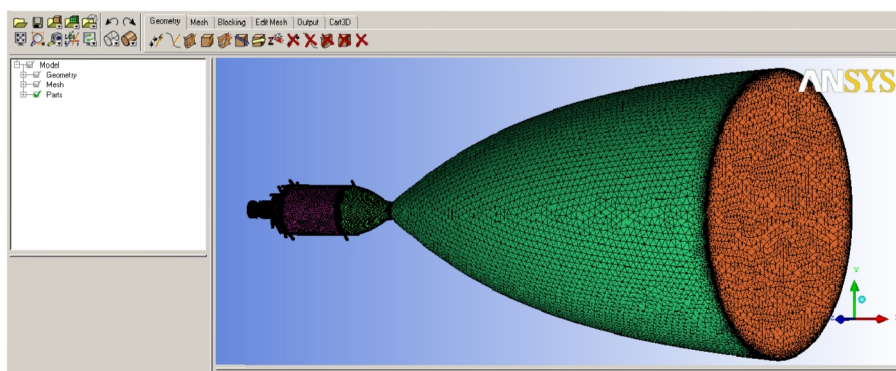


Рисунок 1.9 - Создание сетки

Остался последний шаг – сохранить сетку для загрузки её в ANSYS CFX. Для этого сначала нужно сохранить проект сеткогенератора (кнопка **Save Project** или пункт главного меню **Save Project As...**), а затем экспортировать сетку. Для этого в меню нужно выбрать вкладку **Output** (Вывод), а в ней – **Output to CFX**. Обратите внимание, что содержимое вкладки **Output** (рисунок 1.10) может быть различным в зависимости от настроек ICEM CFD и используемых лицензий.

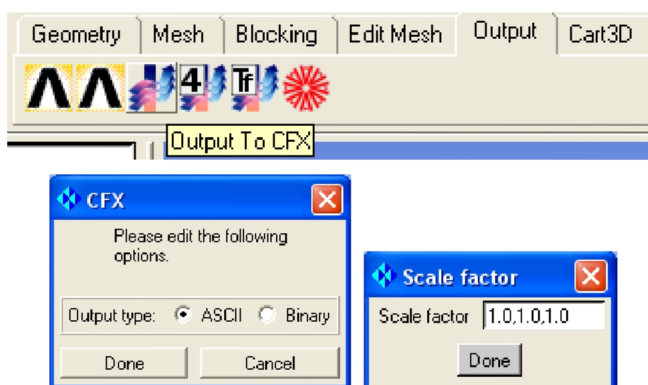


Рисунок 1.10 - Сохранение сетки

В появившемся меню диалоговом окне нужно указать желаемое имя файла и путь к каталогу сохранения. Обращаем внимание также на то, что ICEM CFD не воспринимает русские символы в именах файлов и каталогов, поэтому путь к файлу и его имя не должны их содержать. После нажатия кнопки **Сохранить**, выведется пара диалогов относительно того, в каком формате и в каком масштабе сохранять сетку, на всё нужно ответить

утвердительно, не меняя параметров (**Done**). Если сохранение сетки прошло успешно, в окне событий появится соответствующая надпись:

CFX-5 File .../project1.msh created

1.3 ПОДГОТОВКА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАДАЧИ.

Теперь, когда конечно-элементная модель готова, можно перейти непосредственно к CFD-моделированию в ANSYS CFX. Окно ANSYS CFX представляет собой оболочку (рисунок 1.11), из которой можно запустить любой из программных модулей: препроцессор, решатель или постпроцессор. При запуске любого модуля, его рабочим каталогом становится тот, что указан в данном окне. Поэтому перед началом работы лучше выставить один каталог, поскольку потом все файлы будут автоматически сохраняться в нём. Создание модели начинается как всегда, с препроцессора, нажатием соответствующей кнопки.

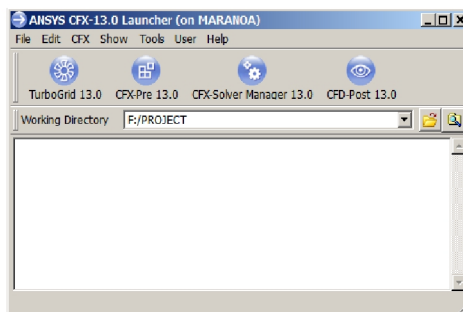


Рисунок 1.11 - Окно старта модулей ANSYS CFX

В окне CFX-Pre (см. рисунок 1.12) нужно создать новый проект (**New Case**). Будет выведено окно выбора типа проекта. Нужно выбрать **Quick Setup** (Быстрая настройка). Это мастер, который поможет описать расчётную задачу.

На информационное сообщение о том, что активна опция автоматического создания расчётных зон, нужно ответить **OK**.

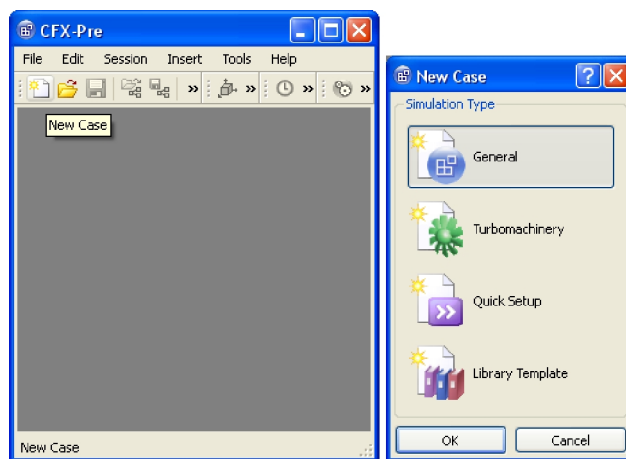


Рисунок 1.12 - Окно CFX-Pre – создание нового проекта

В открывшемся окне можно видеть слева окно мастера, с помощью которого можно пошагово описать задачу (рисунок 1.13). Первая вкладка – это **Simulation Definition** (описание симуляции). Здесь указано, что вид задачи (**Problem Type**) – однофазная (**Single Phase**), рабочее тело с параметрами идеального газа (**Fluid – Air Ideal Gas**), а также есть поле для файла сетки (**Mesh File**). В нём нужно выбрать только что созданный в ICEM CFD файл с расширением **msh**. Как только файл будет выбран, он автоматически прочитается и в окне визуализации справа будет отображена расчётная модель, а также станет активной кнопка **Next** (далее).

На следующей вкладке **Physics Definition** (описание физики) можно видеть пункты **Analysis Type** (Тип анализа) – **Steady State** (стационарный), а также общие данные о модели: ссылочное давление (**Reference Pressure**) – 0 атм, модель теплопереноса (**Heat Transfer**) – **Total Energy** (полная энергия), модель турбулентности (**Turbulence**) – **Omega Reynolds Stress**.

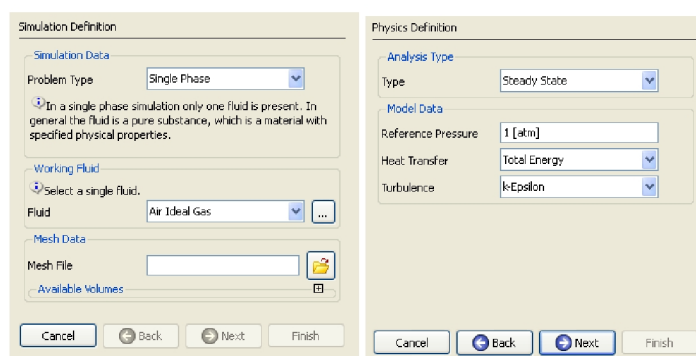


Рисунок 1.13 - Окна мастера Quick Setup

Опорное давление используется для того, чтобы избежать проблем с ошибками округления. Они могут появляться, когда изменение динамического давления в потоке, является небольшим по сравнению с уровнем абсолютного давления.

Например, поток воздуха текущий с небольшой скоростью при небольшом перепаде атмосферного давления может иметь небольшое изменение динамического давления (нескольких Паскалей или меньше), но перепад относительно атмосферного давления достигает 100 Паскалей.

Если проводить расчет при абсолютных давлениях, это небольшое изменения давления может быть потеряно в ошибках округления - изменение 1 Паскаля - изменение к значению шестого разряда. Чтобы исправить ситуацию, необходимо установить значительный уровень опорного давления. В этом случае, локальное атмосферное давление 100 Паскалей является подходящим. Это значение будет использоваться как новая база (вместо 0 Паскалей). Изменение 1 Паскаль теперь будет изменением к первому разряду.

Опорное давление 0 Паскалей может использоваться, когда изменение динамического давления являются существенными по сравнению с уровнем абсолютного давления.

При расчете ЖРД перепад давления от входа к выходу достаточно большой поэтому принимаем опорное давление равным 0.

Нажав кнопку **Next**, нужно перейти на вкладку **Boundary Definition** (Описание границ) (рисунок 1.14). Здесь приведены граничные условия, необходимые для описания задачи. Поскольку в ICEM CFD в названия групп были включены буквосочетания **IN** и **OUT**, то CFX автоматически распознал входное (**Inlet**) и выходное (**Outlet**) граничные условия. Кроме того, CFX уже выставил стандартные условия для этих границ: скорость втекания 1 м/с и температура газа на входе 20°C. На выходе же установлен уровень среднего

статического давления, равный нулю относительно опорного значения (**Reference Pressure**), указанного на предыдущей вкладке.

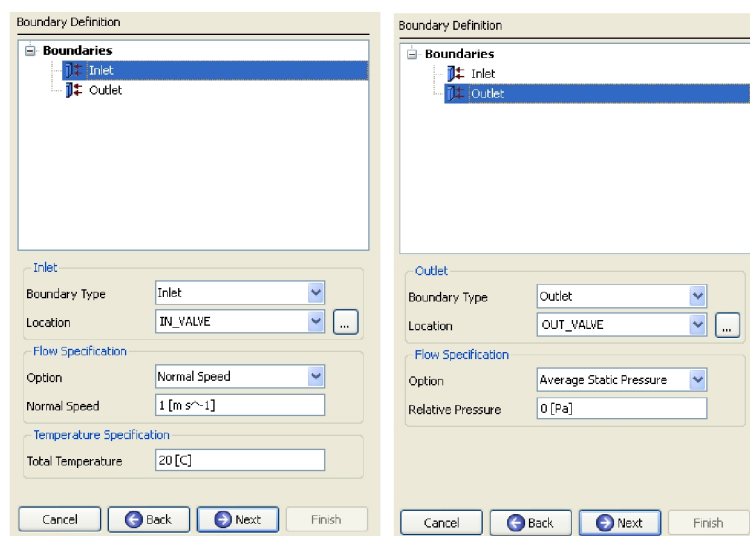


Рисунок 1.14 - Окно Boundary Definition

На последней вкладке **Final Operations** (последние действия) можно выбрать, что нужно делать дальше: запустить расчёт (**Start Solver**) или перейти в общий режим (**Enter General Mode**). Сейчас нужно перейти в общий режим, нажав кнопку **Finish** (Завершить). В общий режим можно также попасть, если на предложение в начале работы ответить не **Quick Mode**, а **General**. Впоследствии, при задании новых симуляций, можно пользоваться любым способом: создавать описание самостоятельно, пользоваться мастером и из него запускать задачу, не заходя в общий режим или, как сейчас, после мастера просматривать условия моделирования в общем режиме.

В общем режиме, можно увидеть стандартное окно CFX (рисунок 1.15). Слева расположено дерево проекта, где указано всё о модели: от сетки до последнего граничного условия. Можете видеть и только что заданные условия. Чтобы их просмотреть или изменить, нужно дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши по названию, а потом закрыть окно редактирования, соответственно применив (**Apply**, **OK**) или не применив (**Close**) произведенные изменения.

Справа от дерева представлено окно визуализации. Там можно посмотреть модель с наложенными граничными условиями, обозначаемыми условными знаками. Её можно вращать и масштабировать, используя различные кнопки мыши, а также кнопки **Pan** (двигать), **Zoom** (масштабировать), **Rotate** (вращать) над окном.

Под окном визуализации расположено окно информации. Там приводятся ошибки, предупреждения и подсказки, которые отображаются соответственно красным, желтым и синим цветом. Нужно всегда обращать внимание на эти сообщения. Сейчас окно пустое, это значит, что модель полностью корректная.

Нужно сохранить модель, выбрав в главном меню во вкладке **File** пункт **Save Case** (Сохранить симуляцию), или нажав соответствующую пиктограмму на панели быстрого доступа. В появившемся диалоговом окне нужно указать имя файла, например **example1** и нажать **Save** (сохранить). При этом будет сохранён так называемый файл симуляции, с расширением **cfx**. Это файл препроцессора.

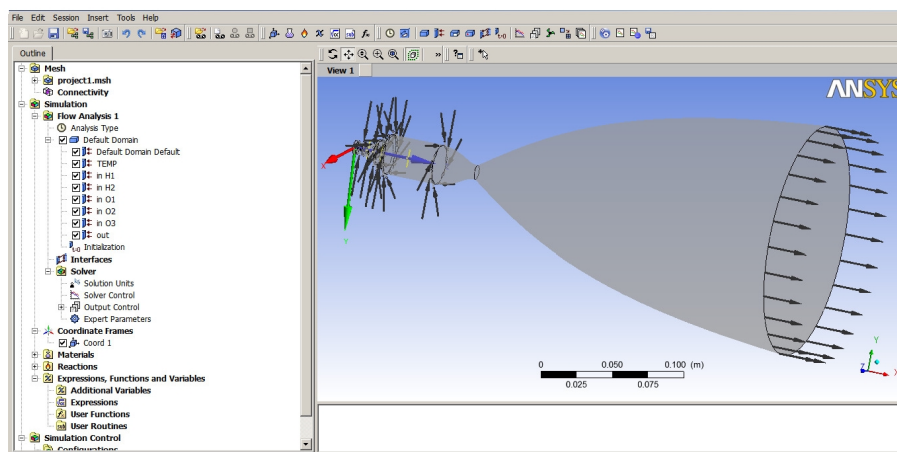
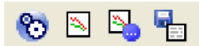


Рисунок 1.15 - Задача в окне CFX в режиме General

Решателю нужен файл в другом формате – так называемый **Definition File** (файл описания задачи) с расширением **def**. Чтобы его сформировать, нужно в препроцессоре нажать одну из кнопок **Define Run** (Описать расчёт), **Start Solver** (Запустить решатель), **Start Solver and Monitor** (Запустить

решатель и монитор), **Write Solver Input File** (Записать входной файл решателя) . **Write Solver Input File** только записывает **def**-файл, но не запускает решатель, запустить его можно позже самостоятельно. **Start Solver** запускает решатель в скрытом режиме, а **Start Solver and Monitor** запускает решатель в режиме мониторинга (рисунок 1.16)

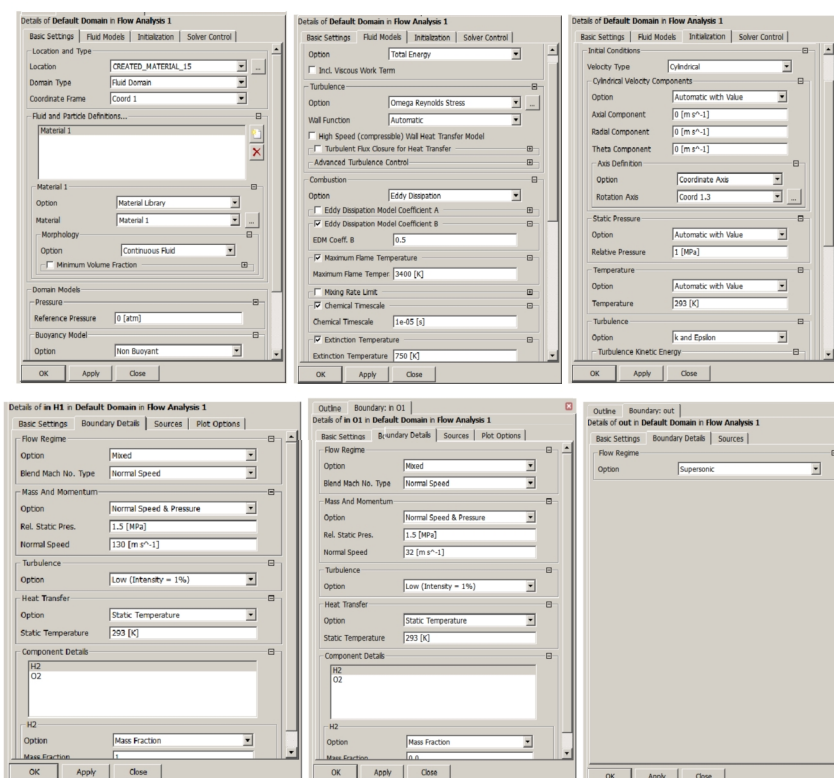


Рисунок 1.16 – Описание расчета

1.4 МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ГОРЕНИЯ

При выборе модели турбулентности необходимо исходить из физических свойств течения. В данном случае выбор модели турбулентности в пользу модели расчета напряжений Рейнольдса **Omega Reynolds Stress** продиктован тем что $k-\epsilon$ или $k-\omega$ не обладают анизотропией вектора скорости и в задачах с большой закруткой занижают окружающую составляющую скорости путем увеличения других составляющих скоростей, что приводит к неверным результатам.

В настоящее время многими работами отечественных и зарубежных исследователей доказана адекватность применения моделей турбулентности RSM для расчета задач с высокой турбулентностью [2, 4, 5, 7]. модель турбулентности задается в окне Turbulens (рисунок 1.17)

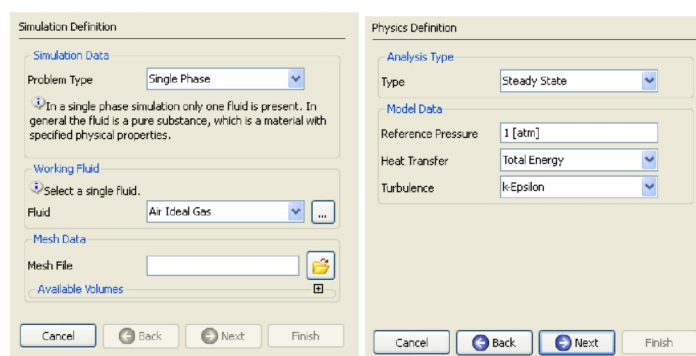


Рисунок 1.17 – Запуск модели турбулентности

Далее формируем модель горения [8]. Необходимо найти в дереве проекта раздел **Reactions** и нажав по нему правой клавишей мыши в появившемся меню нажать **Import Library Data** (рисунок 1.18) и из открывшейся базы данных выбрать интересующие реакции. В качестве примера выберем реакцию взаимодействия кислород-водород **Hydrogen Oxygen**.

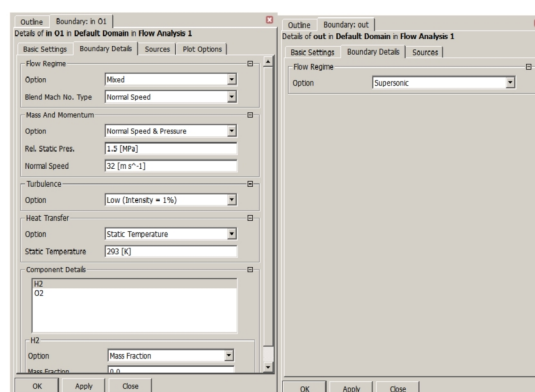


Рисунок 1.18 – Выбор необходимых реакций

Заходя в свойства реакции горения выбираем модель горения Eddy Dissipation (эмпирическая модель разрушения вихрей), которая применяется

в случае быстро протекающих химических и турбулентного течения для определения усредненной скорости реакции. В этом случае скорость реакции управляется скоростью турбулентного перемешивания ε/k , то зона реакции может быть описана как суперпозиция областей сгоревшего (прореагировавшего) и несгоревшего (непрореагировавшего) потоков. В EDM модели вводится дополнительная переменная, описывающая скорость «разрушения» областей несгоревшего газа на более мелкие фрагменты из-за турбулентного перемешивания.

Далее производим настройку модели горения указывая скорость прохождения реакции, температуры начала реакции и ее окончания, коэффициент смешения (рисунки 1.19, 1.20).

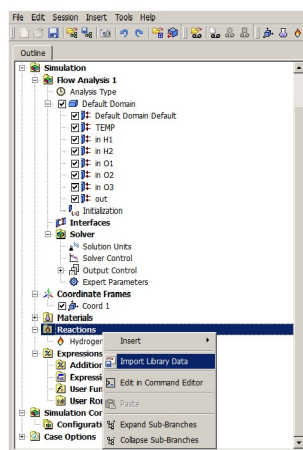


Рисунок 1.19 – Настройка модели горения

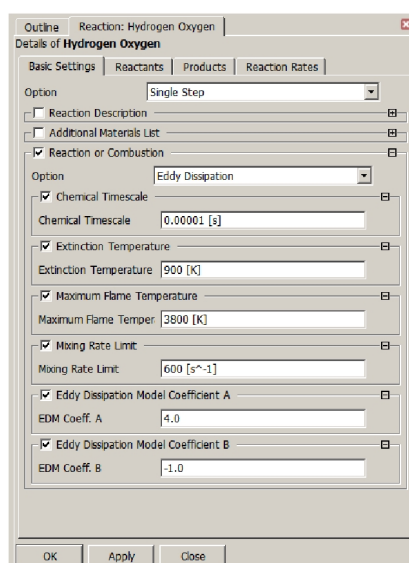


Рисунок 1.20 – Выбор модели горения и задание исходных данных

После проведения настроек начальных и граничных условий, выбора модели турбулентности, выбора и настройки модели горения, производим настройку метода решения.

Далее переходим к проведению расчета.

1.5 ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА

Можно выбрать наиболее подходящий способ запуска решателя, в том числе использовать первый пункт **Define Run**, поскольку он позволяет рассмотреть ещё несколько важных опций (рисунок 1.21). В окне можно видеть первое поле – имя файла описания задачи. Если решатель был запущен из CFX-Launcher, то именно здесь нужно было бы указывать def-файл. Далее следует опция **Initial Values Specification** – Описание начальных значений. Она служит для задания начальных условий из файла. Например, начальными условиями для расчёта на качественной сетке могут служить результаты предварительного расчёта на грубой. Задание качественных начальных условий ускоряет расчёт, поскольку, чем ближе параметры в ячейках к физике процесса, тем легче решателю найти численное решение уравнений Навье-Стокса.

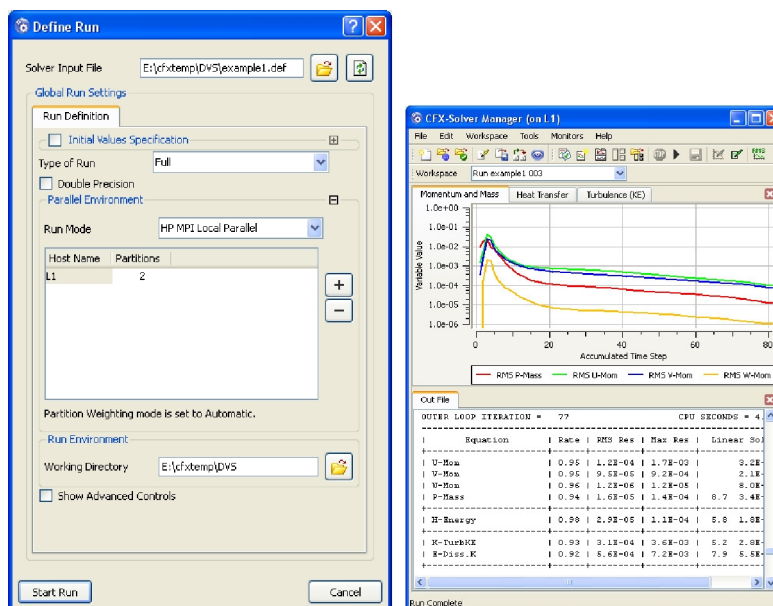


Рисунок 1.21 - Запуск решателя

Если в распоряжении имеется компьютер с двумя и более ядрами процессора, то также может быть полезен пункт **Parallel Environment** (Параллельное окружение). Задачи CFD-моделирования ресурсоемкие в плане вычислений. Для решения задач среднего уровня сложности нужно до нескольких часов расчетного времени. В код CFX встроены возможности для параллельного расчёта на нескольких ядрах одного компьютера, а также на нескольких компьютерах по сети. Следует применять локальное распараллеливание (**Local Parallel**) на ядрах многоядерного процессора или процессорах одного многопроцессорного компьютера с общей памятью, что позволяет ускорить решение в разы. Чтобы его задать, нужно выбрать тип распараллеливания: **HP MPI Local Parallel** или **MPICH2 MPI Local Parallel** (зависит от лицензий и операционной системы), и указать число процессов, соответствующее числу доступных ядер процессоров.

Последний пункт – **Working Directory** (рабочий каталог) – каталог, где будет создавать свои файлы решатель. Если он был выставлен в CFX-Launcher'е для всей задачи, то что-то менять нет необходимости. Нажимаем **Start Run** (Запустить выполнение).

Окно решателя представляет собой две панели. Верхняя – это панель монитора невязок. Нижняя – это окно Log-файла, куда записываются все события, происходящие при расчёте, этот файл сохраняется и может быть прочтён по окончании расчёта. Если решатель развернуть на весь экран, разделитель панелей становится из вертикального горизонтальным.

Когда невязки дойдут до требуемого уровня (по умолчанию это 10^{-4}), расчёт остановится автоматически и выведется сообщение (рисунок 1.22). Результатом расчёта является файл с расширением **res**. Сообщение нужно закрыть, нажав кнопку **ОК**. Если предварительно поставить галочки в пунктах **Post-Process Results** и **Shut sown CFX Solver Manager**, то соответственно будет запущен пост-процессор с данными результатами и закроется решатель.

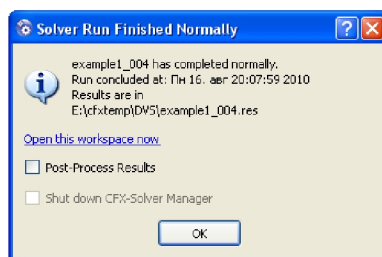


Рисунок 1.22 - Сообщение об окончании расчёта

Окно постпроцессора выглядит аналогично препроцессору (рисунок 1.23). Справа – в окне визуализации можно видеть модель, слева – дерево проекта, под ним – окно свойств элементов, оно сейчас неактивно, поскольку никакой элемент не выделен. Вверху также располагается главное меню, а чуть ниже – кнопки быстрого доступа.

1.6 ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Дерево проекта содержит иные ветви, чем в препроцессоре. Они относятся к визуализации результатов, поэтому параметры решателя и сетки здесь отсутствуют. Однако есть раздел **User Locations and Plots** (Расположения и рисунки пользователя), в котором по умолчанию есть объект **Wireframe** (каркас). Если отключить или включить его галочку – соответственно отображение каркаса отключится и включится.

Но кроме каркаса можно увидеть иные параметры, например векторную картину течения. Для этого в главном меню нужно выбрать пункт **Insert→Vector** (Вставка→Вектор) либо воспользоваться аналогичной кнопкой на панели быстрого доступа (рисунок 1.24). В появившемся диалоговом окне можно задать имя векторного поля, а можно согласиться с предложенным по умолчанию. В окне свойств откроется панель свойств векторного поля. В ней на вкладке **Geometry** (Геометрия) нужно указать в пункте **Locations** (расположения) – границу **Plane 1, Reduction** (Уменьшение) – **Reduction factor, # Factor** (Коэффициент изменения) – 1. Затем нажать **Apply**.

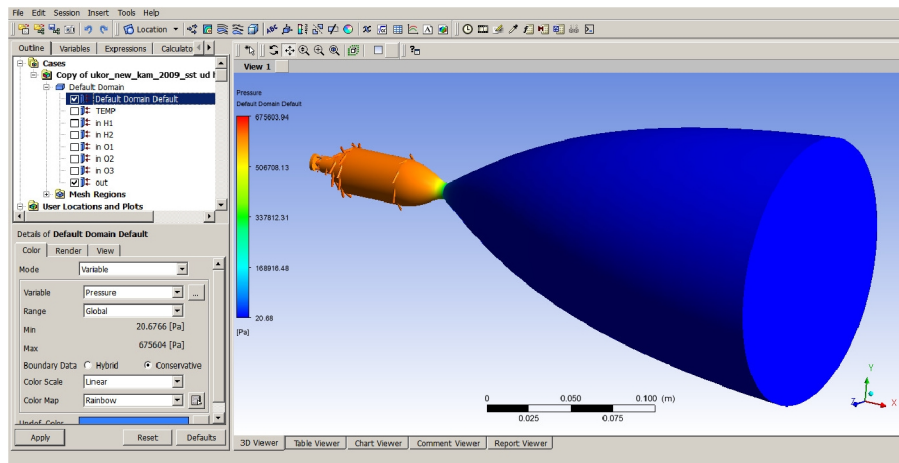


Рисунок 1.23 - Окно пост-процессора CFX-Post

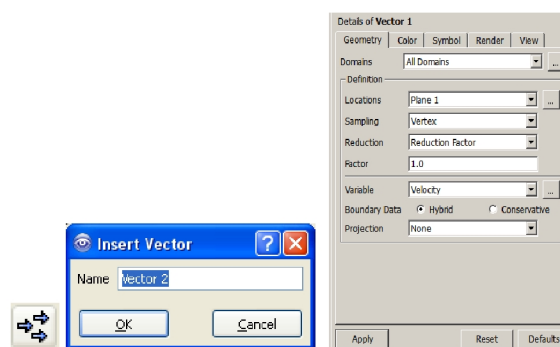


Рисунок 1.24 - Создание поля векторов

Чтобы лучше рассмотреть созданное векторное поле, лучше развернуть модель в плоскость экрана. Для этого можно воспользоваться вращением или щелкнуть правой кнопкой мыши на окне визуализации и в появившемся контекстном меню выбрать **Predefined Camera** (заданный вид) и далее **View Toward + Z** (вид в положительном направлении оси Z) (рисунок 1.25).

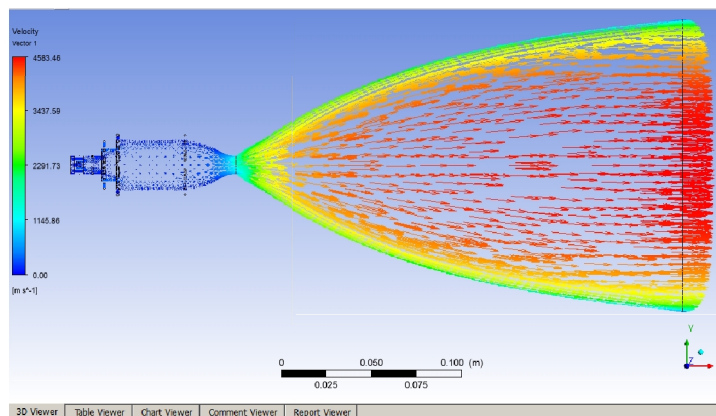


Рисунок 1.25 - Векторное поле скорости

Слева от модели расположена *легенда*, устанавливающая соответствие цвета векторов значениям скорости. Значения в ней приводятся в стандартной записи. Следует обратить внимание на указание единиц измерения под легендой: они указываются в квадратных скобках в математической форме $[m\ s^{-1}]$, что обозначает «метр, умноженный на секунду в минус первой степени», т.е. метр, делённый на секунду (m/c).

Длина векторов тоже соответствует значению скоростей в данных точках. Чем больше скорость, тем длиннее вектор и наоборот. Однако длину векторов можно регулировать или сделать одинаковой для удобства. Для этого нужно переключиться в окне свойств векторного поля на вкладку **Symbol** (Символ), установить размер символа (**Symbol Size**) равным 0.2, а также поставить галочку «Нормализовать символы» (**Normalize Symbols**). Что бы увидеть результаты изменений (рисунок 1.26), нужно нажать **Apply**.

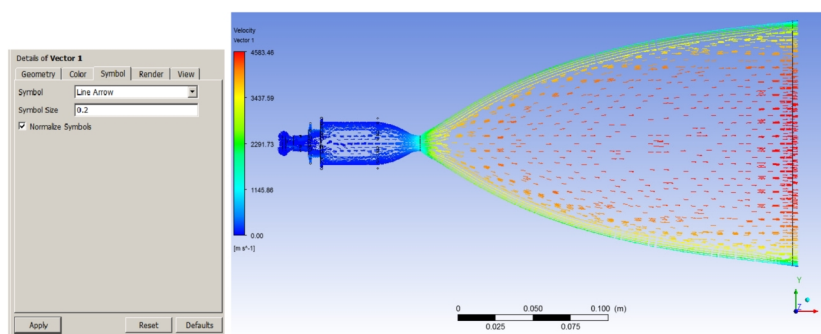


Рисунок 1.26 - Нормализованное поле векторов

Картину течения можно также просмотреть, если использовать элемент **Streamline** (линии тока). Для удобства нужно отключить отображение векторного поля, убрав с него галочку в дереве проекта. Затем вставьте объект **Streamline**, нажав на соответствующую кнопку (рисунок 1.27). Также как и раньше, нужно соглашаться с автоматическим названием. В окне свойств выбрать тип (**Type**) – поверхностные линии тока (**Surface Streamline**). Поверхность (**Surfaces**) указать **Sym**. Число точек (**# Points**) – 10. Нажать **Apply** для просмотра результата.

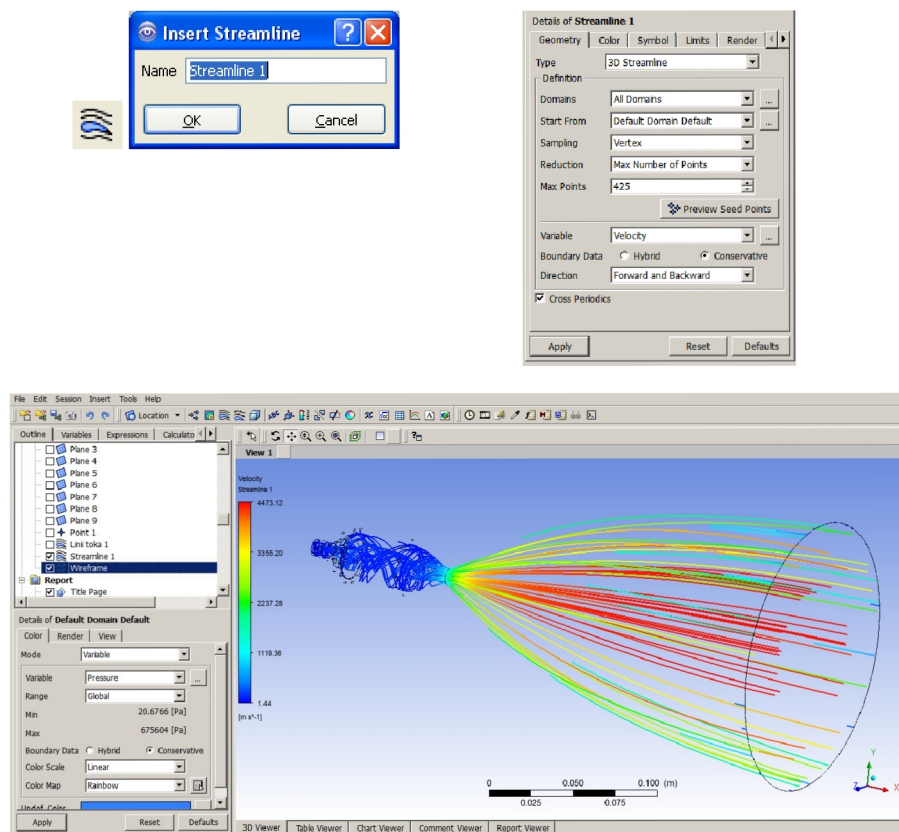


Рисунок 1.27 - Линии тока

Следующим основным элементом визуализации являются контуры (**Contour**). Добавить контур (рисунок 1.28) можно, указав в **Location** границу **Sym** и нажать **Apply**. Будет отображен контур статического давления (**Pressure**), которое было указано по умолчанию. Линии тока также по прежнему отображаются. Можно включить ещё дополнительно отображение векторов, а также попробовать отображать на контуре поля разных параметров, меняя значения в поле **Variable** (переменная) и каждый раз нажимая **Apply**. На рисунке 1.29 представлены поля статической температуры и скорости.

В CFX-Post можно сохранить состояние постпроцессора в файл с расширением **cst**. Туда записываются данные только о свойствах элементов визуализации (контуры, векторные поля и т.п.), а также ссылка на используемые **res**-файл. Однако, сохраненное состояние постпроцессора можно загрузить на другой **res**-файл похожей конфигурации. Сохранить состояние можно через главное меню (**File→Save State**) или соответствующей кнопкой на панели быстрого доступа.

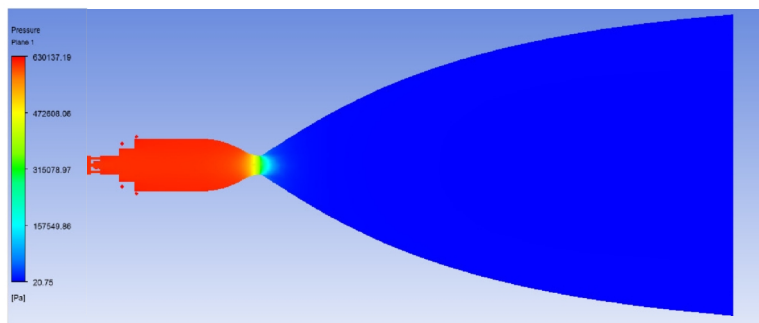
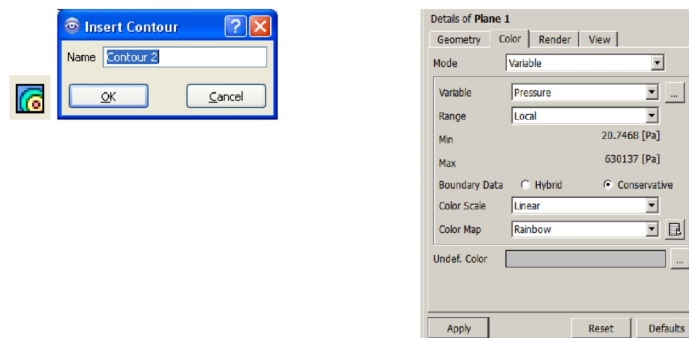


Рисунок 1.28 - Контур статического давления

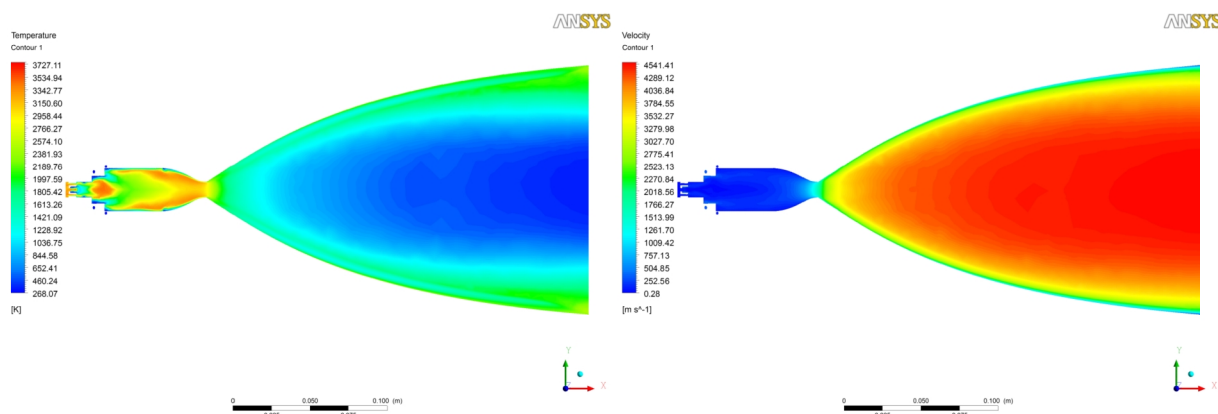


Рисунок 1.29 - Поля статической температуры (Temperature) слева и скорости (Velocity) справа.

Вид полей распределения параметров, показывает, что решение – в области резкого изменения параметров (высоких градиентов) не плавные, «рваные». Это из-за того, что решение было получено на грубой сетке. В этом можно убедиться, если войти в свойства контура (двойным щелчком на имени в дереве проекта), затем перейти на вкладку **Render** (отображение), и в поле **Draw Mode** (режим рисования) поставить **Draw As Lines** (рисовать как линии), а затем нажать кнопку **Apply**. Из-за грубой сетки, которую видно сейчас на экране и происходят резкие «скачки» параметров от ячейки к ячейке. И это не только результат отображения. Расчёт, выполняющийся на

грубой сетке, может оказаться неточным вследствие недостаточной степени дискретизации уравнений Навье-Стокса. Иными словами, плавные функции будут представлены ломаными линиями со слишком малым количеством звеньев, что приведет к большой погрешности. Поэтому для качественного расчёта желательно пересчитать задачу на более мелкой сетке.

2 РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ПРИМЕРА ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД НА ТОПЛИВЕ КИСЛОРОД-ВОДОРОД

Математическая модель, на базе которой проводится расчет параметров рабочего процесса ракетного двигателя, представляет собой систему дифференциальных уравнений движения рабочего тела в форме Навье-Стокса, обеспечивающую расчет течения в до-, транс- и сверхзвуковой областях пространственных стационарных течений турбулентной высокотемпературной многокомпонентной смеси продуктов сгорания кислорода и водорода в расчетной области камеры двигателя.

Для моделирования турбулентности применена модель на основе напряжений Рейнольдса (RSM), модифицированная под «закон стенки» для структуры потока и тепломассообмена в пристенной области.

Выбрана диффузионная модель горения EDM с простой химической реакцией, протекающей в одну стадию с относительно большой скоростью, когда лимитирующей является скорость смешения компонентов топлива по сравнению со скоростью протекания химической реакции. Эффективные числа Прандтля и Шмидта приняты равными единице.

Теплообмен на стенке камеры двигателя соответствует условиям непроницаемости, стенки нереагирующие и адиабатные.

Математическая модель позволяет получать картины распределения газодинамических параметров в продольном и характерных поперечных сечениях, эпюры распределения газодинамических параметров вдоль тракта ЖРД и основные интегральные параметры потока продуктов сгорания, представляющие интерес для оценки рабочего процесса двигателя и используемые для целей контроля достоверности получаемых расчетных результатов.

Учитывая профиль внутреннего контура камеры ЖРД, сгенерирована сложная неоднородная гибридная сетка с общим числом элементов около 6,0 млн.

В качестве начальных условий на входе в объект использовано постоянство скорости компонентов $V_{\text{вх.о.г}} = \text{const}$, а в выходном сечении сопла двигателя – постоянство давления окружающей среды $p_n = \text{const}$.

2.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

- Компоненты ракетного топлива – газообразные кислород и водород;
- Тяга ЖРД – 100Н;
- Массовые соотношения компонентов топлива – $K_m = 8,0$ (7,937);
- Давление компонентов топлива на входе в двигатель - $P_{\text{вхо.г}} = 1,53 \text{ МПа}$
- Расход газообразного окислителя (кислорода) - $\dot{m}_g = 20,0 \text{ г/с}$;
- Расход газообразного горючего (водорода) - $\dot{m}_g = 2,5 \text{ г/с}$;
- Суммарный расход топлива - $\dot{m} = 22,5 \text{ г/с}$;
- Давление в камере сгорания – $P_k \leq 1,0 \text{ МПа}$;
- Приведенная длина камеры сгорания - $L_{\text{пр}} = 0,4 \text{ м}$;
- Степень расширения рабочего тела в сопле (геометрическая степень расширения $\bar{F}_c = 250$);
- Профилирование сопла Лавала проводится в соответствии с [1];
- Конструктивная схема ЖРД представлена на рисунке 2.1;
- Схема расположения характерных сечений в тракте камеры ЖРД представлена на рисунке 2.2;
- Основные геометрические параметры ЖРД представлены в таблице 2.1;
- Основные геометрические параметры линий подвода компонентов топлива представлены в таблице 2.2.

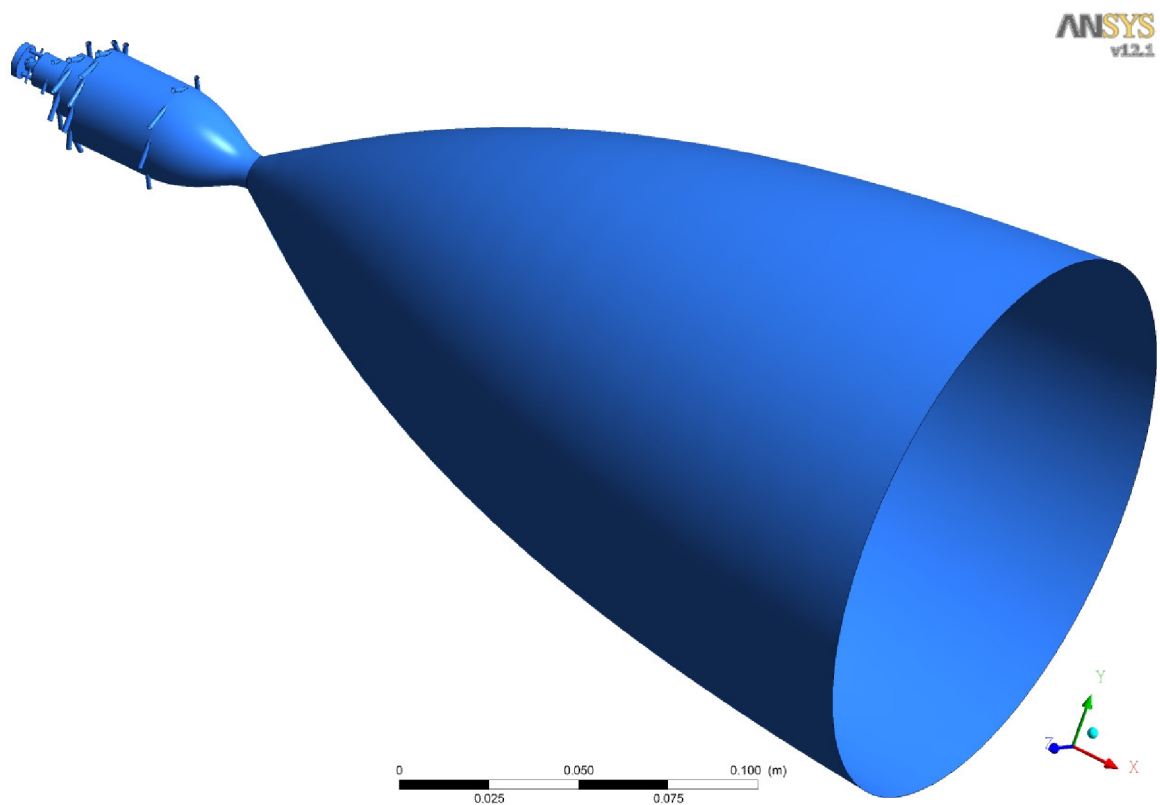


Рисунок 2.1 – Схема организации рабочего процесса кислородно-водородного ЖРД

ANSYS

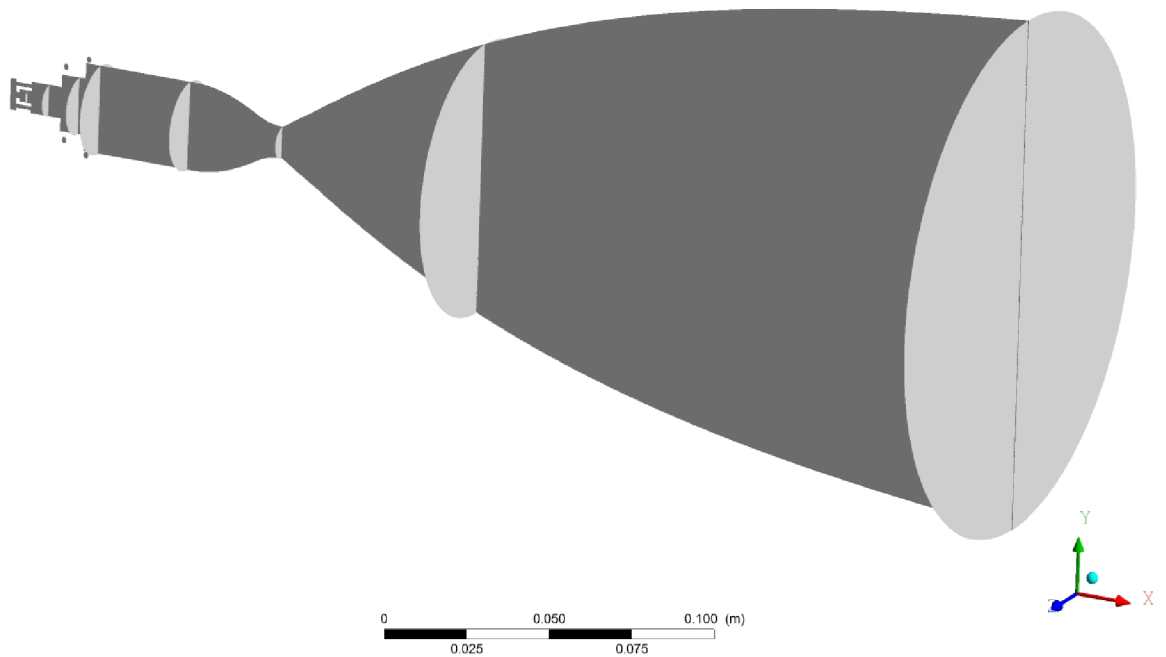


Рисунок 2.2 – Схема расчетной области с характерными сечениями вдоль тракта ракетного двигателя

Таблица 2.1 – Основные геометрические параметры ЖРД

Геометрия камеры двигателя													
d ₁ мм	d ₂ мм	d ₃ мм	d ₄ мм	d ₅ мм	d ₆ мм	d ₇ мм	l ₁ мм	l ₂ мм	l ₃ мм	l ₄ мм	l ₅ мм	l ₆ мм	l ₇ мм
2,0	4,0	10,0	18,0	24,0	10,0	160,0	2,0	4,0	10,0	8,0	30,0	25,0	260,0

Таблица 2.2 – Основные геометрические параметры ЖРД

Геометрия линий подвода компонентов				
d _{1г} мм	d _{2г} мм	d _{1о} мм	d _{2о} мм	d _{3о} мм
0,73x4	1,5x8	1,07x4	1,6x12	1,2x8

2.2 СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ

На рисунке 2.3 представлена структура течения в виде распределения линий тока потока рабочего тела вдоль тракта камеры сгорания ЖРД а) и б). Подача газообразных кислорода и водорода в основном, осуществляется через тангенциальные каналы, эффект закрутки (эффективного смешения) компонентов имеет место в предкамере сгорания, что видно по характерному искривлению линий тока. По мере развития течения линии тока рабочего тела становятся упорядоченными. На участке предкамеры и камеры сгорания проявляется механизм турбулентного перемешивания потоков газообразных кислорода и водорода. Он характерен для развитых закрученных течений, поэтому его использование является дополнительным фактором влияния на полноту сгорания топлива в камере. Необходимо стремиться к увеличению степени закрутки компонентов, что приведет к более существенной деформации структуры течения и, как следствие, к более эффективному преобразованию топлива.

Как следует из рисунка 2.3 б) и материалов [1], влияние закрутки потока рабочего тела локализовано в пределах камеры сгорания, транс- и

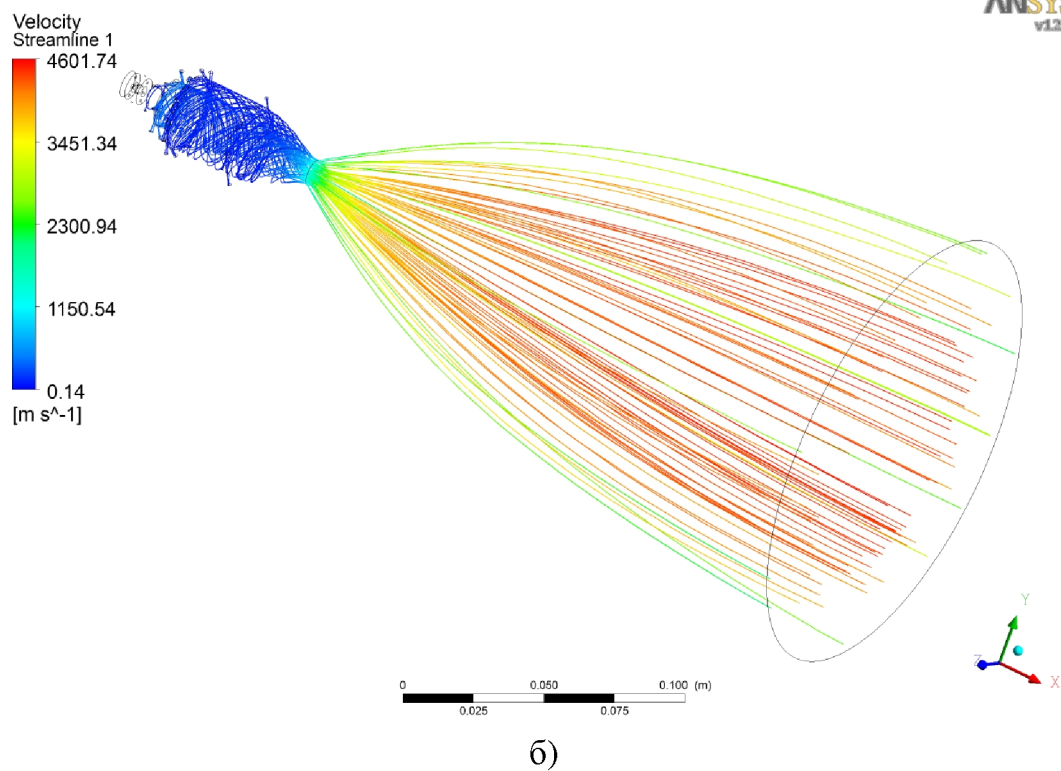
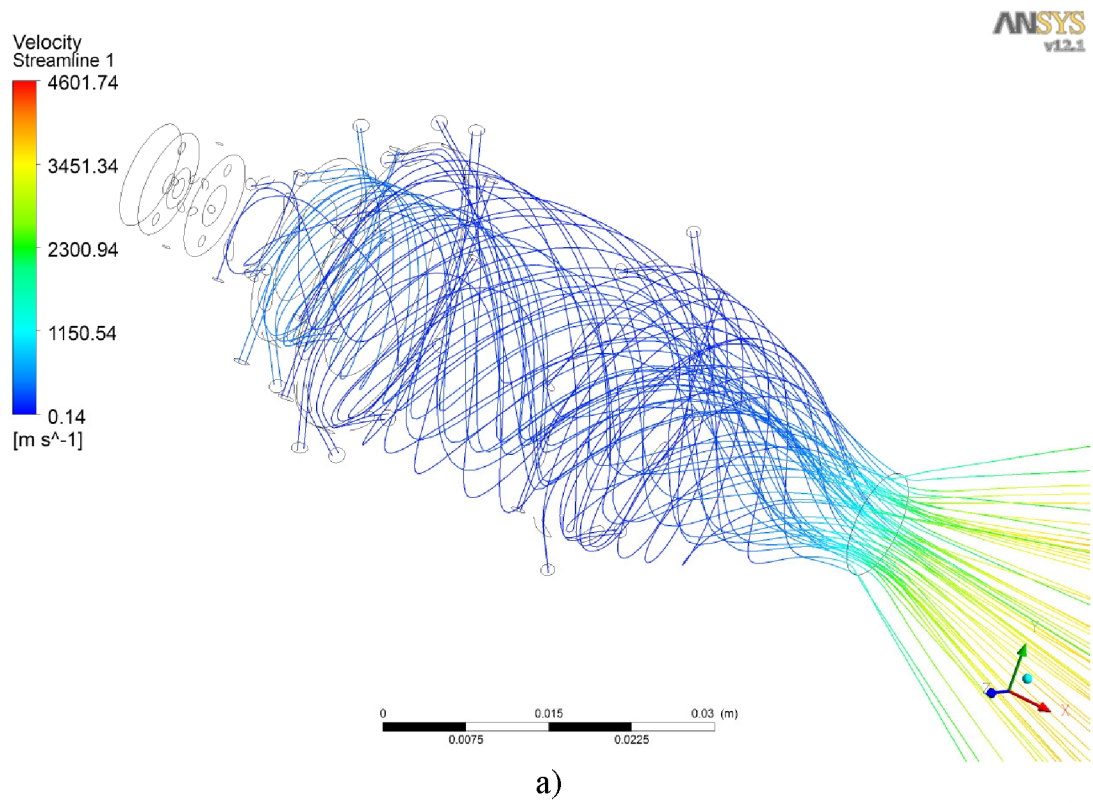


Рисунок 2.3 – Распределение линий тока рабочего тела вдоль тракта камеры ЖРД (в камере сгорания а) и в камере ЖРД б))

сверхзвукового сопла до $\bar{F}_c < 20$. Поэтому при $\bar{F}_c = 250$ на срезе сопла реализуется практически одномерное течение продуктов сгорания и дополнительных потерь удельного импульса тяги из-за организации закрученного течения в камере сгорания не зарегистрировано.

2.3 КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.

Картины распределения газодинамических параметров в тракте камеры ЖРД в продольном направлении представлены на рисунках 2.4...2.12. На рисунках 2.4 ... 2.7 показано распределение скорости и её составляющих: осевой, окружной и радиальной, также дано изменение числа Маха в объеме камеры двигателя (рисунок 2.5). Распределение статического и полного давлений, концентраций кислорода и водорода, статической и полной температуры представлено на рисунках 2.8, 2.9, 2.10...2.11; 2.12...2.13 соответственно. Основная информация, заложенная в картинах – это возможность оценить неоднородность распределения газодинамических параметров в пределах расчетной области и основные закономерности их изменения.

Кроме самостоятельного значения данных заключенных в картинах распределения параметров важна и их взаимосвязь. Так, значения полной скорости, давления и температуры включают в себя значения: составляющих скорости, динамическую надбавку и информацию о концентрациях для правильной трактовки результатов.

Важным с точки зрения оценки эффективности рабочего процесса ЖРД является распределение полной температуры продуктов сгорания в тракте камеры ракетного двигателя, как энергетического параметра, ответственного за основные интегральные величины.

Результаты представлены на рисунке 2.12.

Отметим наличие протяженных зон повышенной температуры в предкамере и камере сгорания, начинающихся в сечении подачи основных

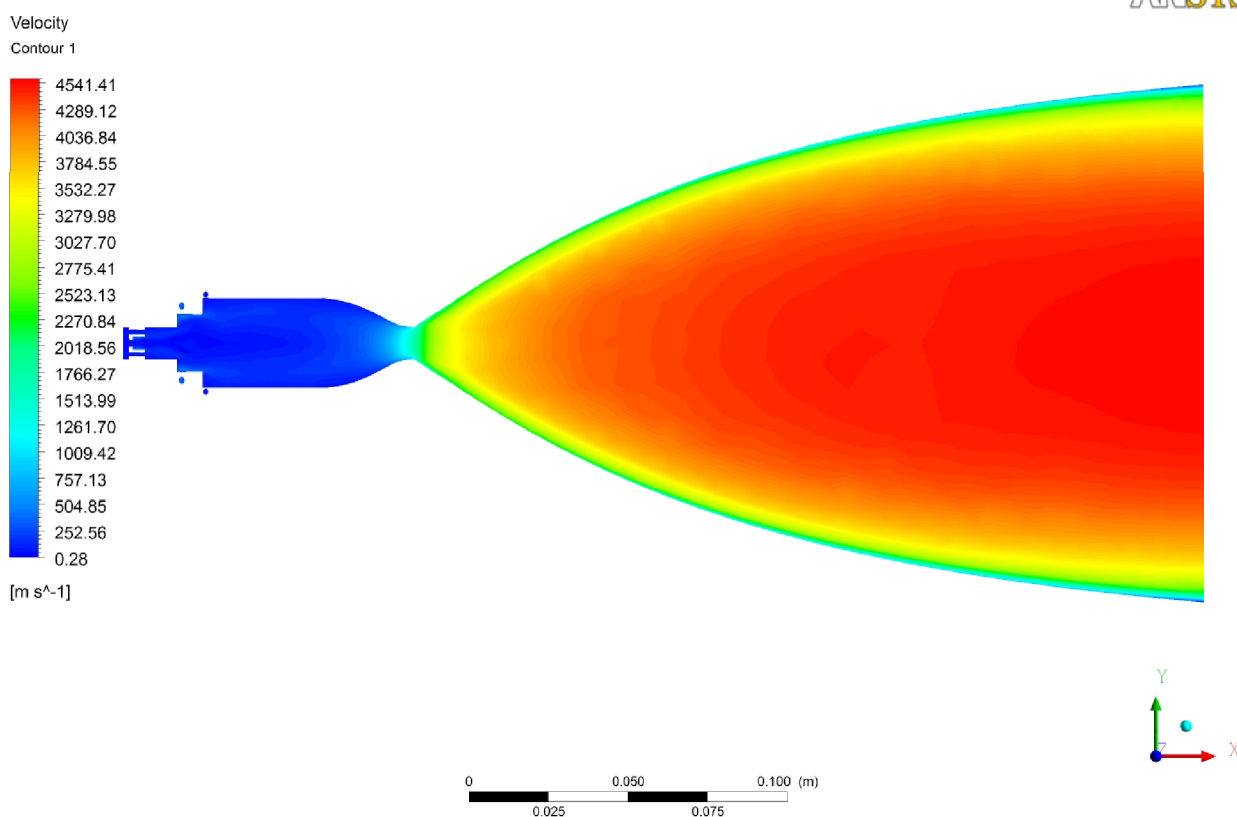


Рисунок 2.4 – Распределение скорости продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

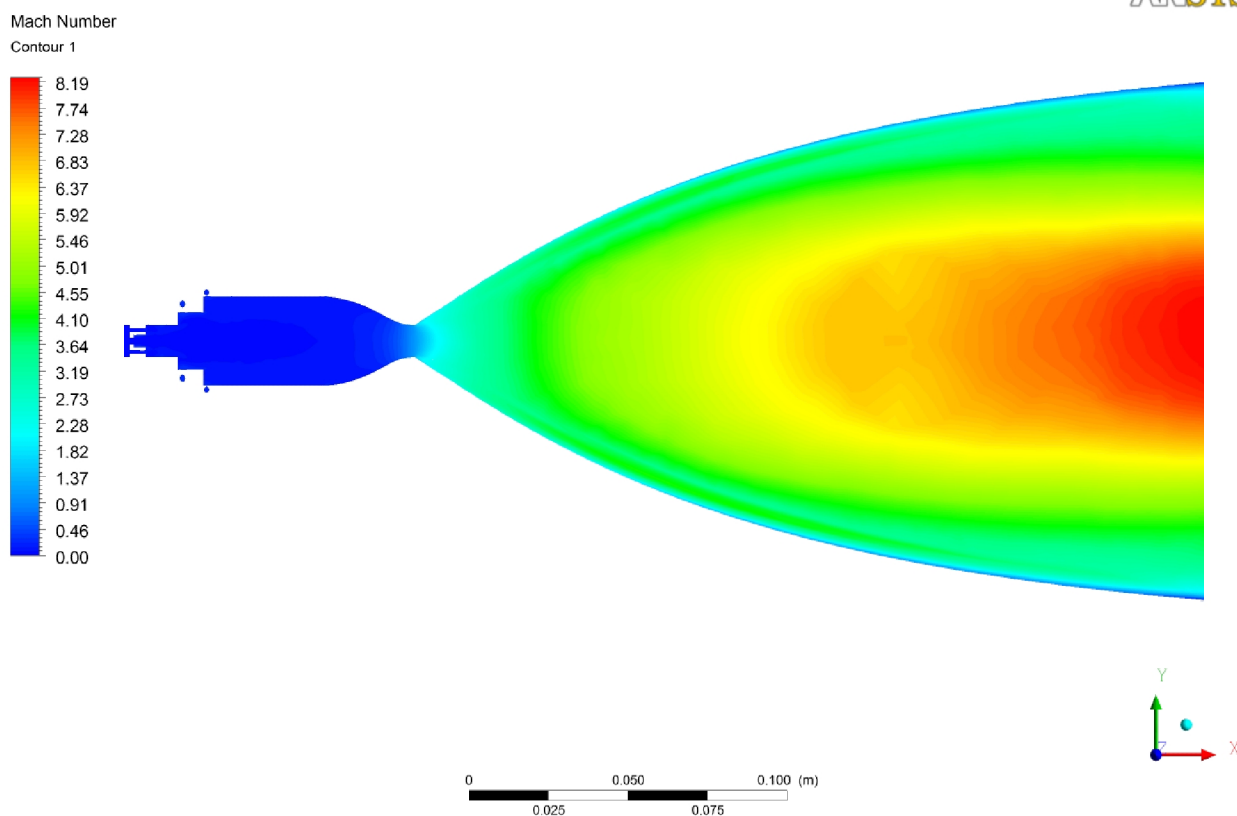


Рисунок 2.5 – Распределение числа Маха продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

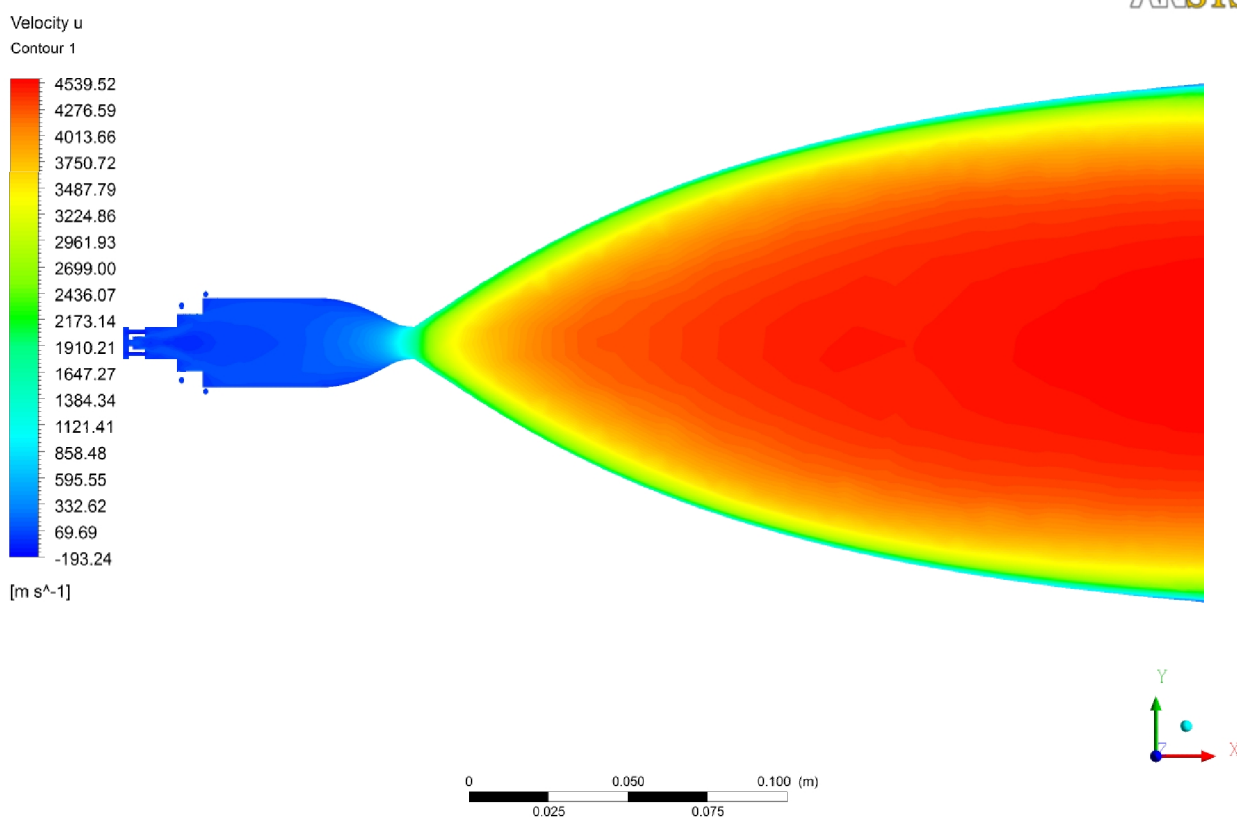


Рисунок 2.6 – Распределение осевой составляющей скорости продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

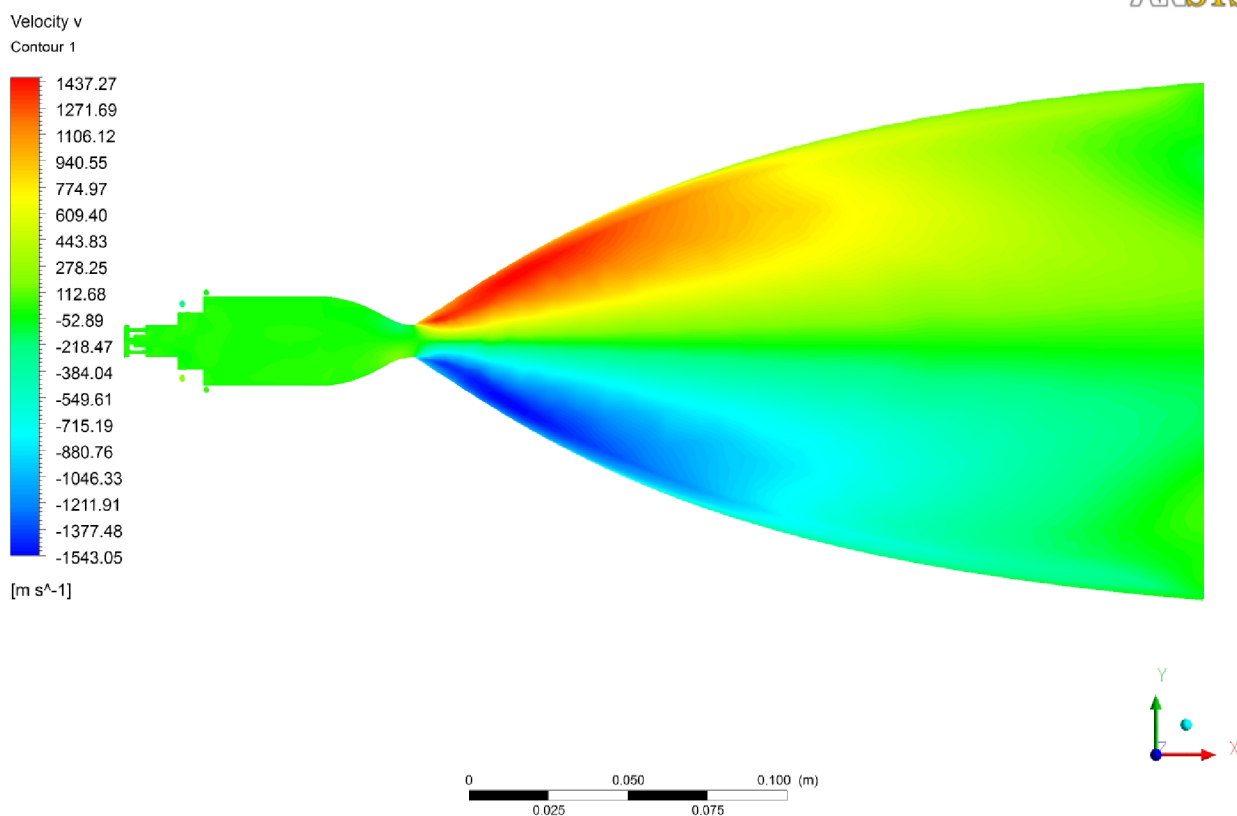


Рисунок 2.7 – Распределение окружной составляющей скорости продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

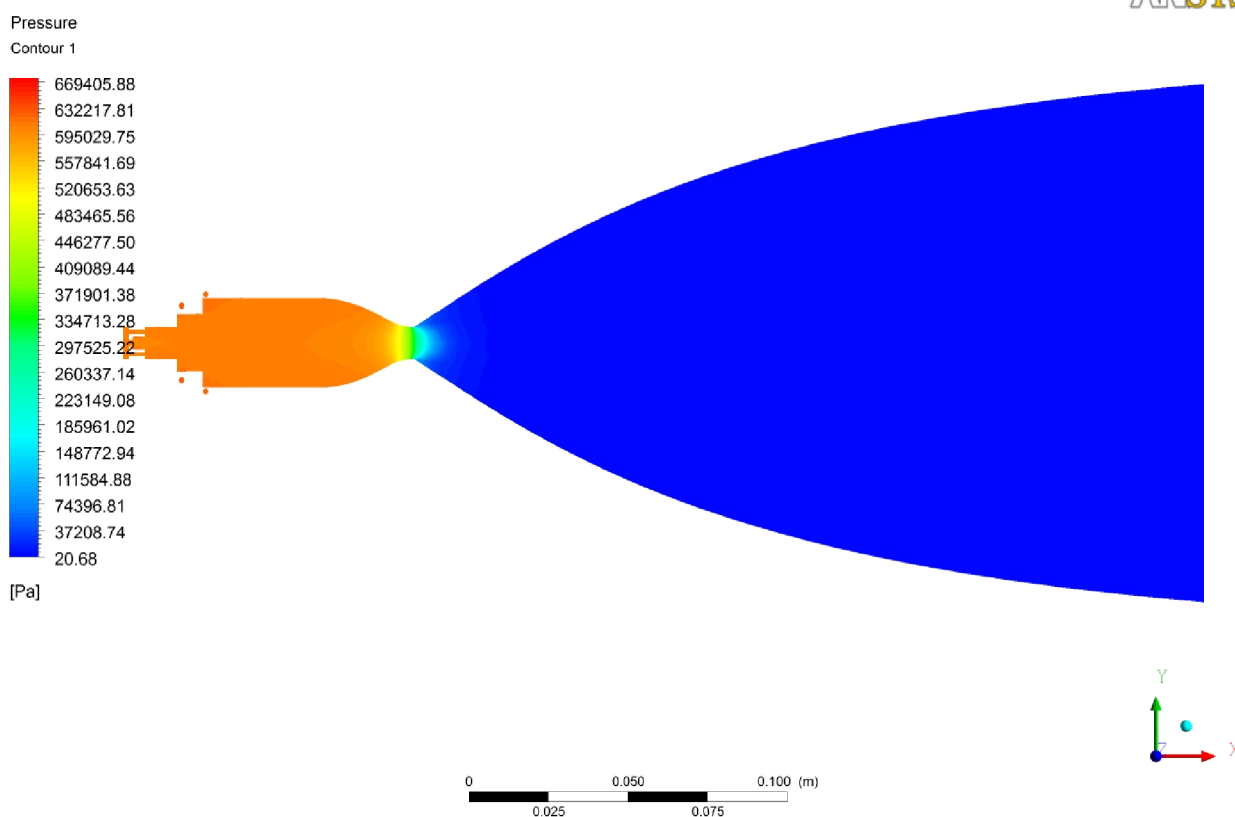


Рисунок 2.8 – Распределение статического давления продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

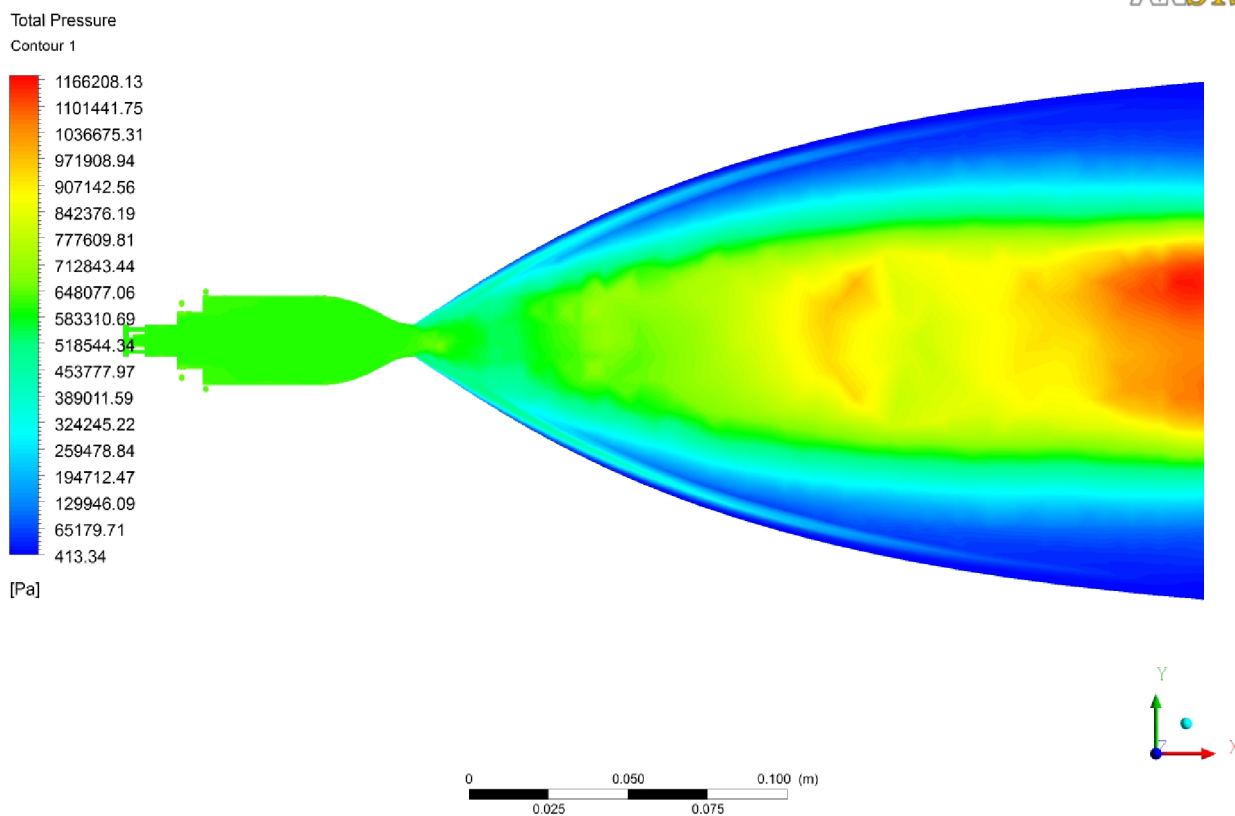


Рисунок 2.9 – Распределение полного давления продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

H2.Mass Fraction

Contour 1

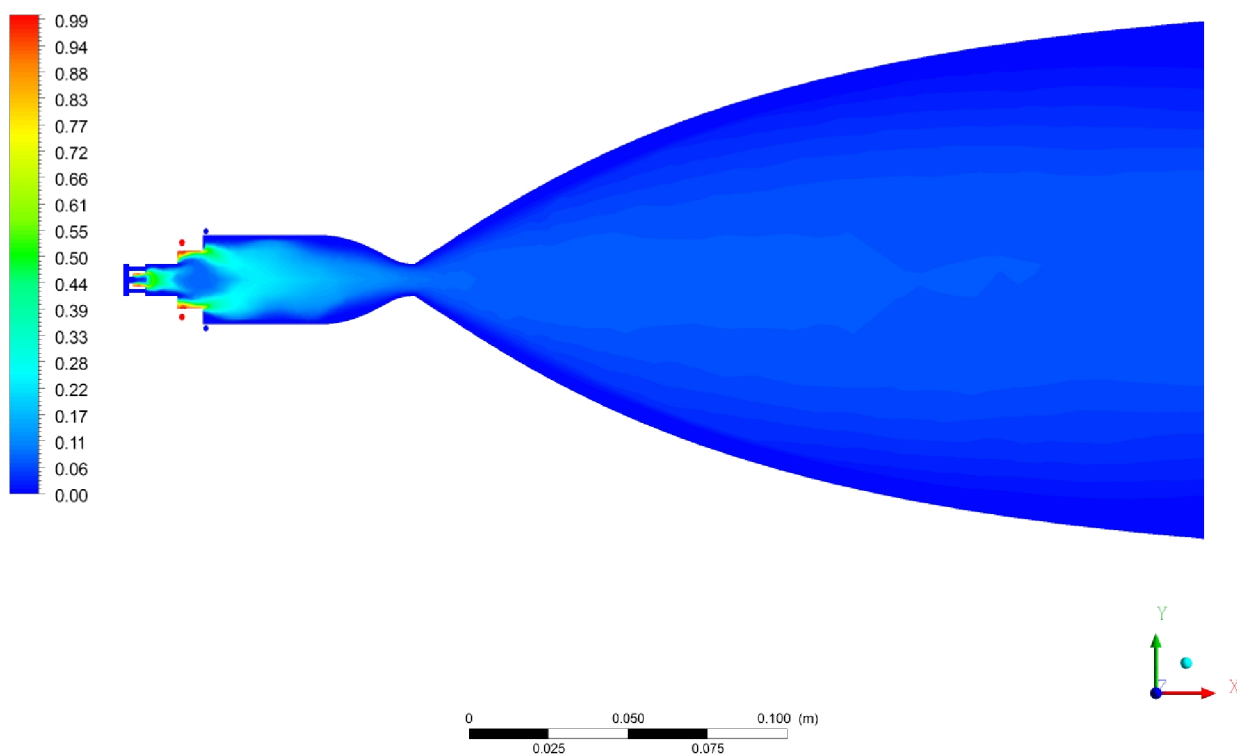


Рисунок 2.10 – Распределение концентрации водорода в продуктах сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

O2.Mass Fraction

Contour 1

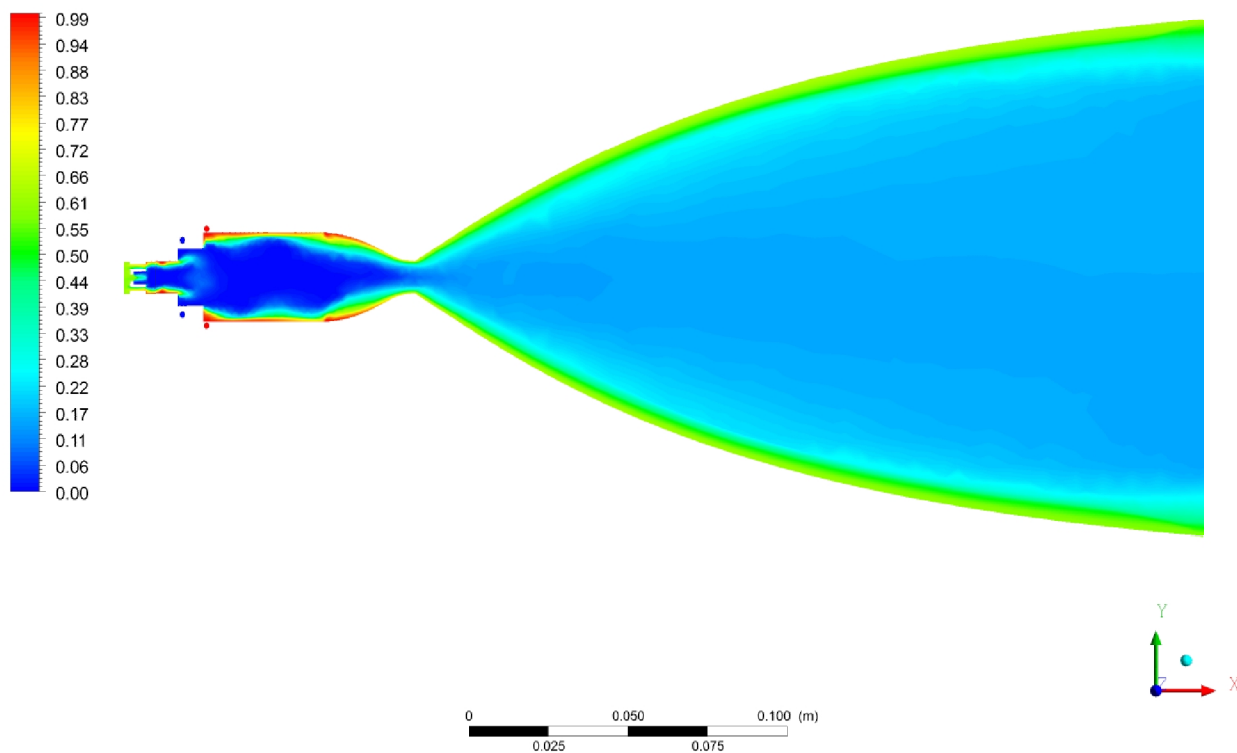


Рисунок 2.11 – Распределение концентрации кислорода в продуктах сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

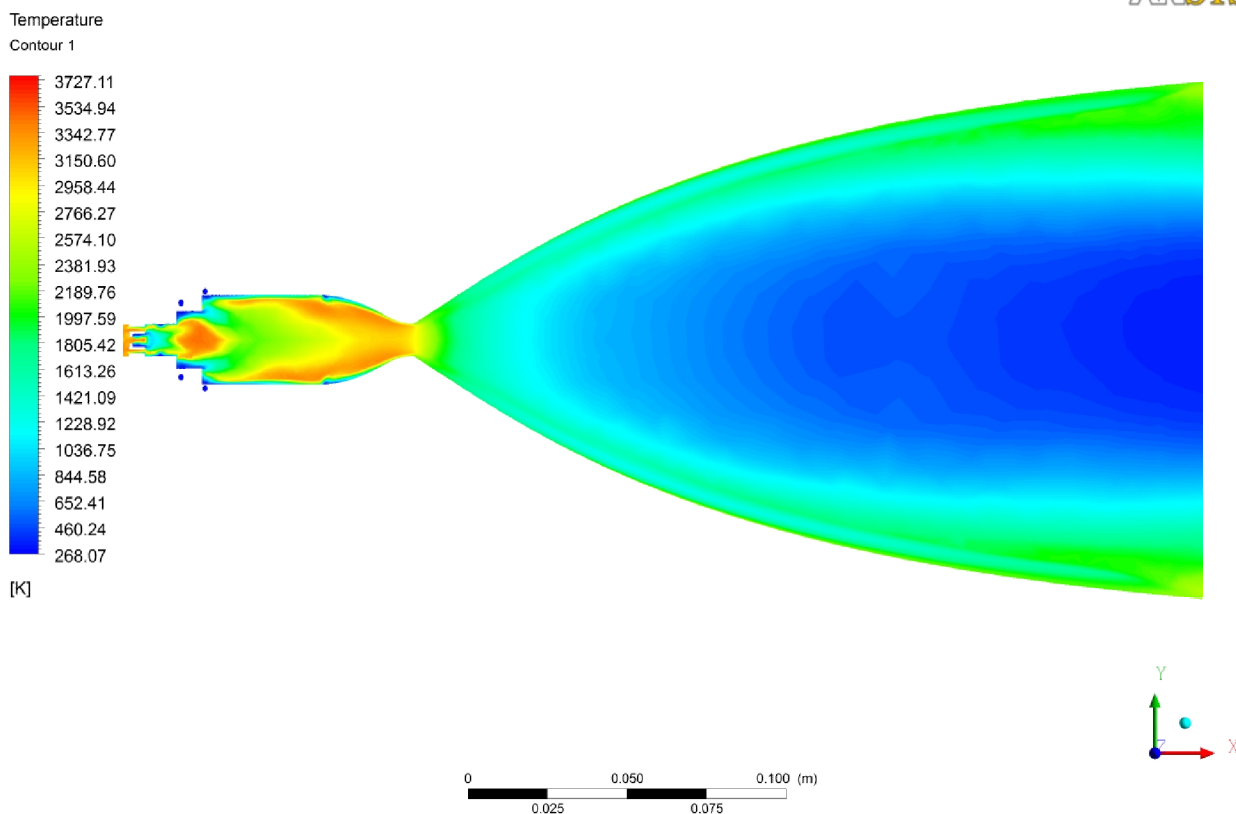


Рисунок 2.12 – Распределение статической температуры продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

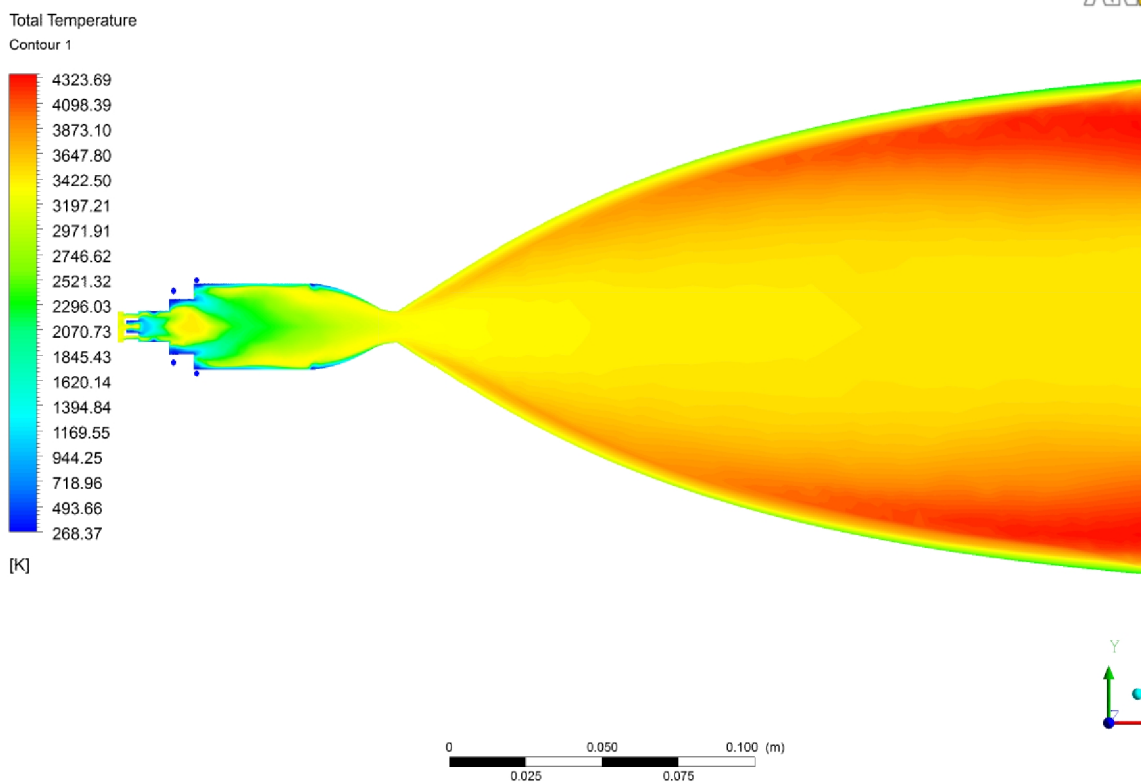


Рисунок 2.13 – Распределение полной температуры продуктов сгорания вдоль тракта камеры ЖРД

компонентов топлива (сечение 3). Можно выделить специально организованные пристенные зоны с пониженной температурой продуктов сгорания вдоль камеры и сопла, которая, в основном, ниже допустимой температуры стенки при применении в качестве конструкционного материала сплавов на основе ниобия и молибдена.

Видно, что внутрикамерные процессы протекают достаточно полно, но резервы совершенствования приведенной схемы смесеобразования имеются.

2.4 ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ (ПОЛНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ) ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ОБЛАСТИ СТЕНКИ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ.

На рисунке 2.14 представлены картины распределения температуры торможения продуктов сгорания в области стенки камеры ЖРД как основа оценки теплового состояния конструкции двигателя. Сопоставляя значения температуры продуктов сгорания с допустимой температурой стенки выбранного конструкционного материала можно найти компромиссное решение либо меняя материал стенки конструкции (с более высокими значениями T_{cm}^{don}), либо обеспечивая более низкую температуру у стенки камеры двигателя.

Анализ результатов, представленных на рисунке 2.14, указывает на существование проблемных зон в дозвуковой части сопла Лаваля вблизи минимального сечения.

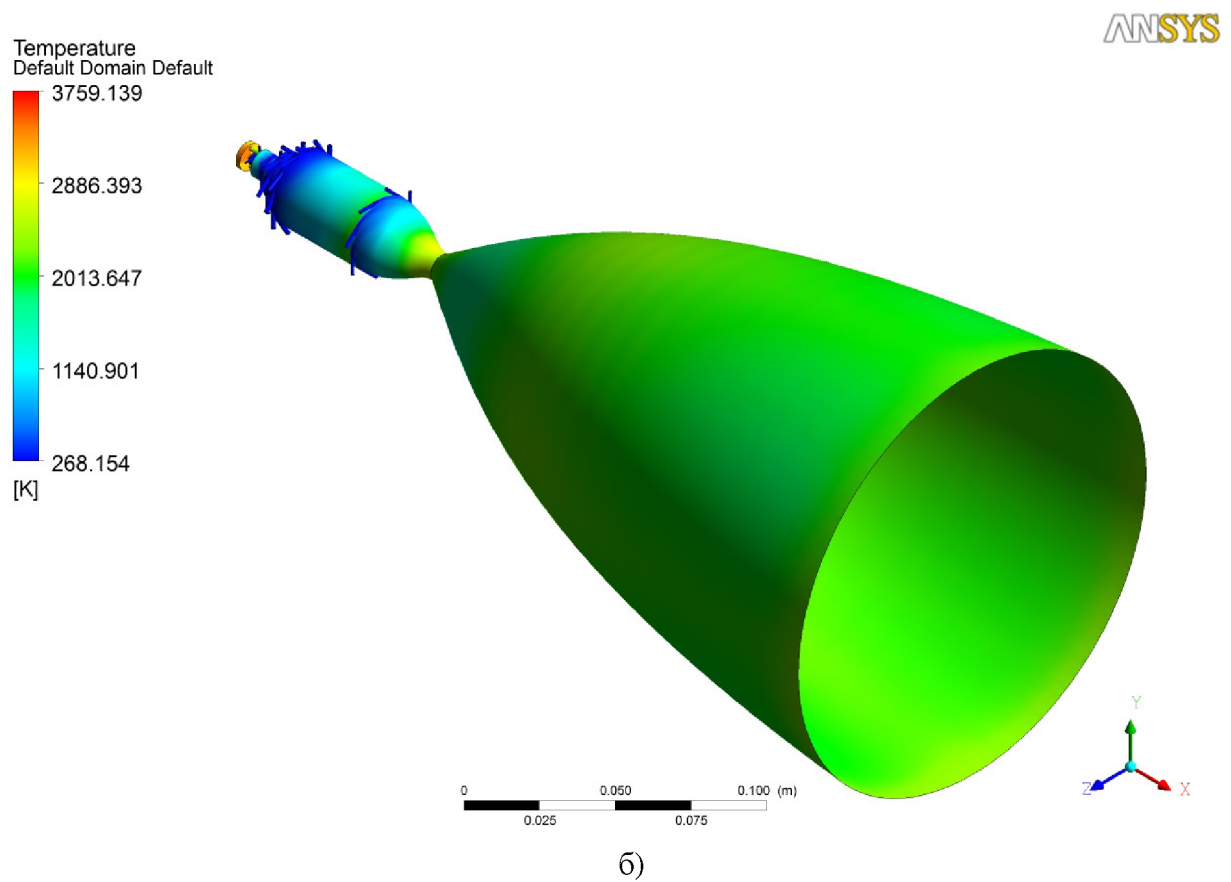
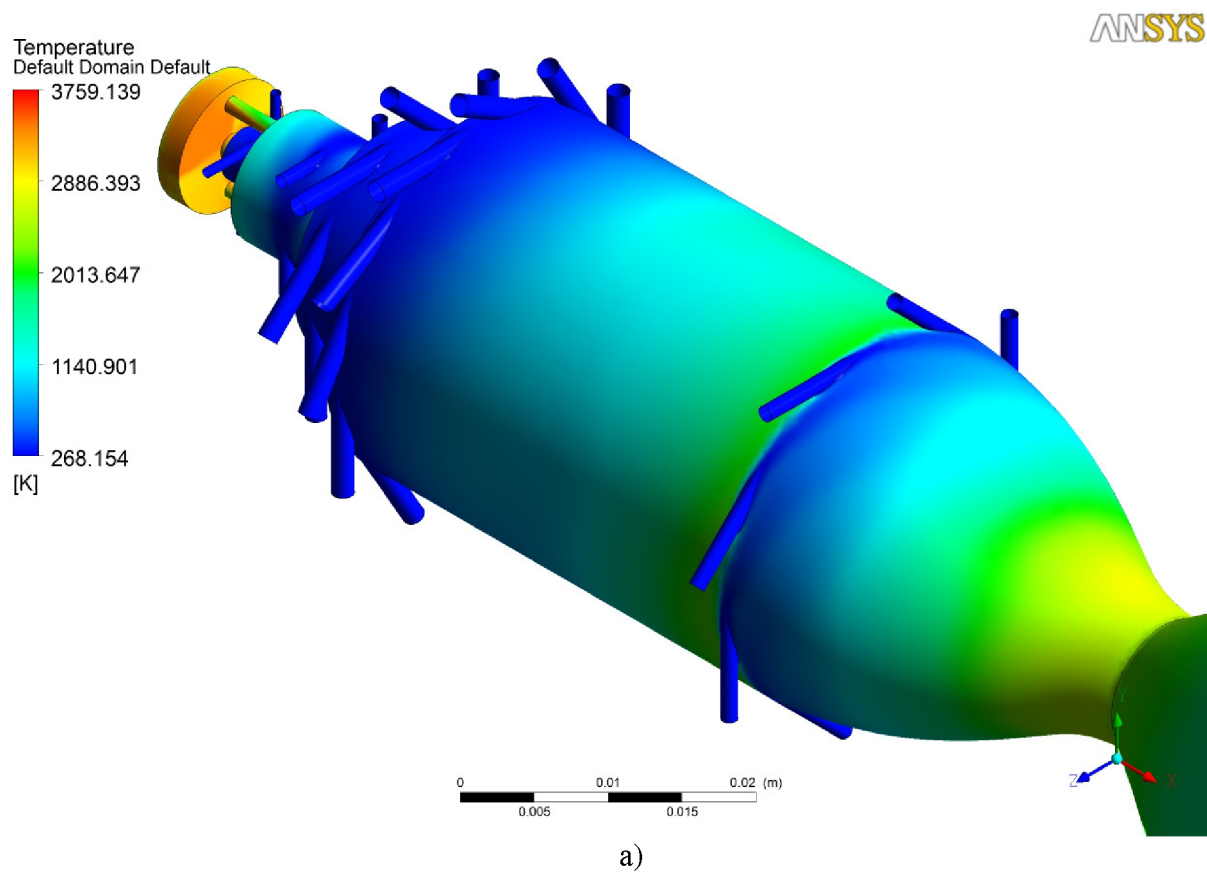


Рисунок 2.14 – Распределение температуры продуктов сгорания в области стенки камеры ЖРД

2.5 ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЛНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.

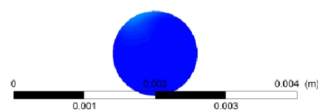
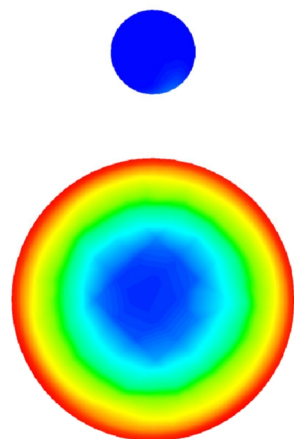
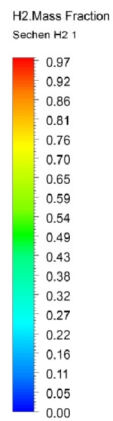
Представляет интерес трансформация полной температуры в характерных сечениях камеры ЖРД, которая характеризует полноту преобразования компонентов топлива. На рисунках 2.15...2.22 представлены результаты расчета концентраций горючего а), окислителя б) и полной температуры в) в восьми сечениях вдоль тракта двигателя. Анализу подлежит равномерность распределения $T_{кс}$ в сечении. Выделим начальное (рисунок 2.15) и конечное (рисунок 2.19) сечение камеры сгорания, где реализуется наиболее существенное приращение температуры торможения, особенно в кольцевой области сечения камеры. Отметим, что в сечении 5 заметна неравномерность распределения полной температуры продуктов сгорания компонентов топлива, что позволяет применить способы совершенствования организации рабочего процесса. Отметим также, что уровень температуры продуктов сгорания в кольцевой области почти достигает предельных значений температуры продуктов сгорания для выбранного массового соотношения компонентов топлива.

Далее по потоку: в минимальном сечении сопла (рисунок 2.20) распределение температуры несколько выравнивается, а в свехзвуковой части сопла в сечениях 7 (рисунок 2.21) и в выходном сечении 8 (рисунок 2.22) неравномерность $T_{кс}^{nc}$ усиливается.

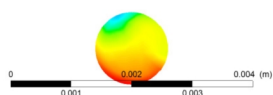
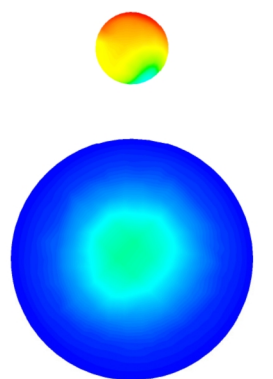
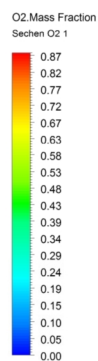
Отметим, что во всех характерных сечениях тракта камеры ЖРД в узкой пристенной области температура продуктов сгорания соизмерима с допустимой температурой стенки конструкционного материала на основе сплавов ниобия.

2.6 ЭПЮРЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.

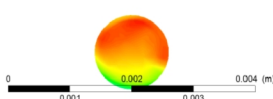
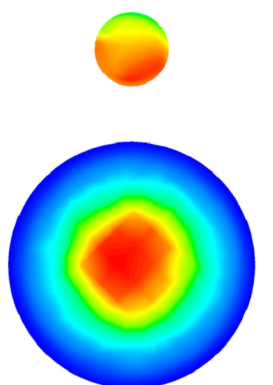
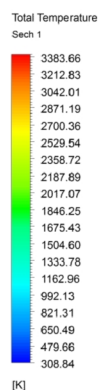
Распределение газодинамических параметров продуктов сгорания в характерных сечениях тракта ЖРД представлены на рисунках 2.23...2.54. В



a)

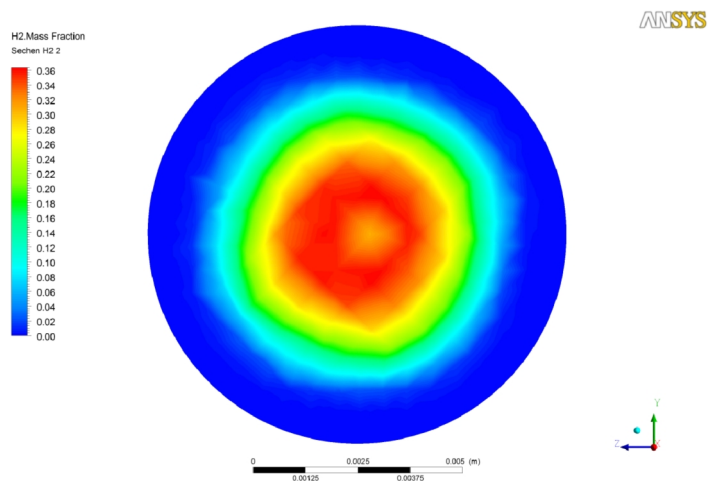


б)

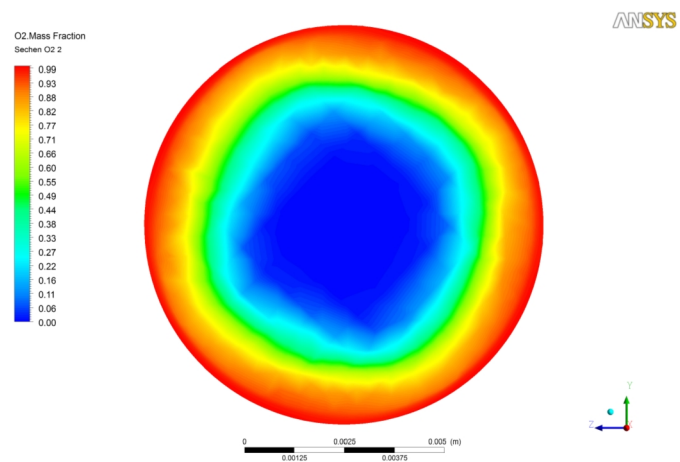


в)

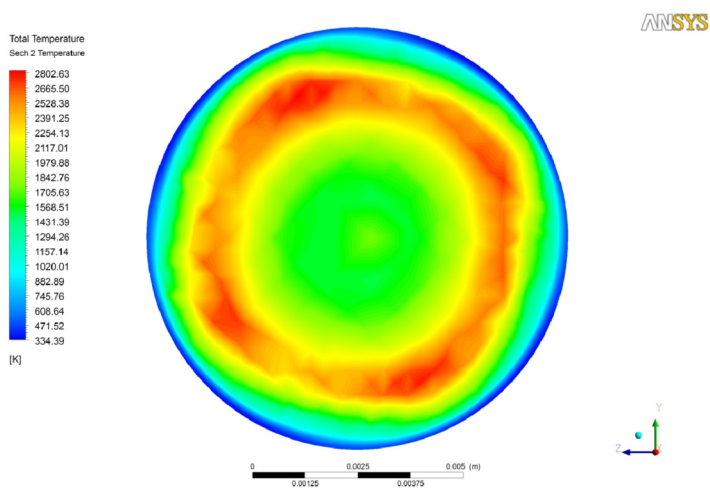
Рисунок 2.15 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 1 тракта камеры ЖРД



а)



б)



в)

Рисунок 2.16 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 2 тракта камеры ЖРД

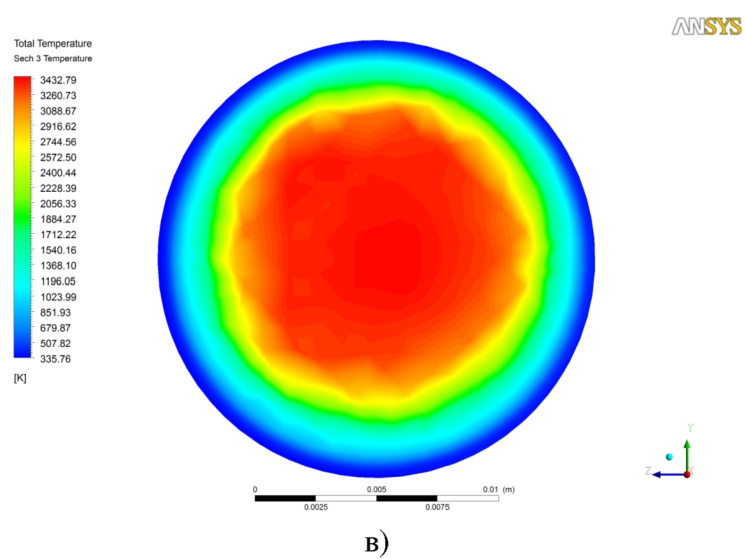
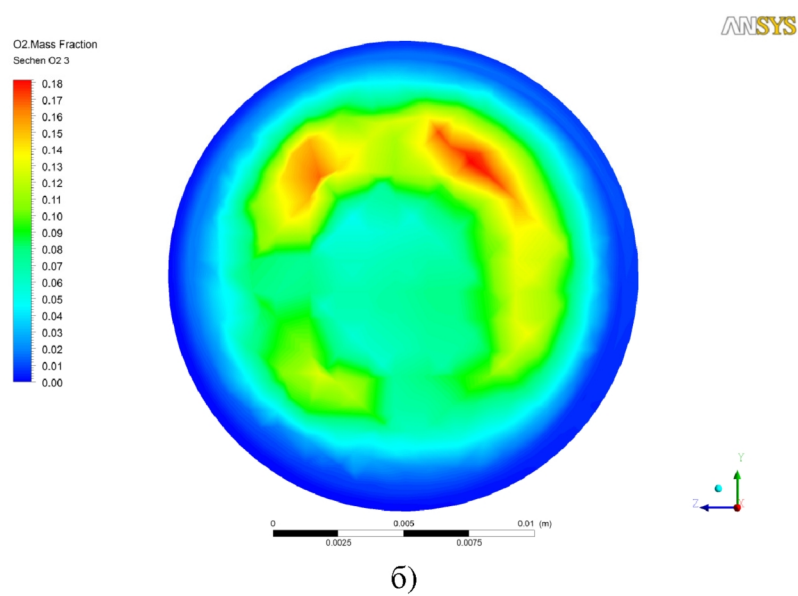
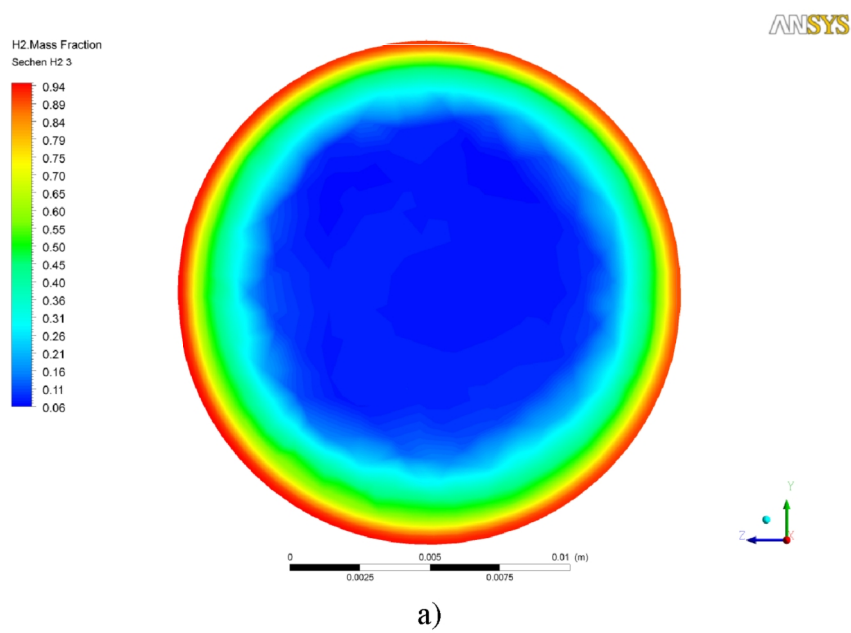


Рисунок 2.17 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 3 тракта камеры ЖРД

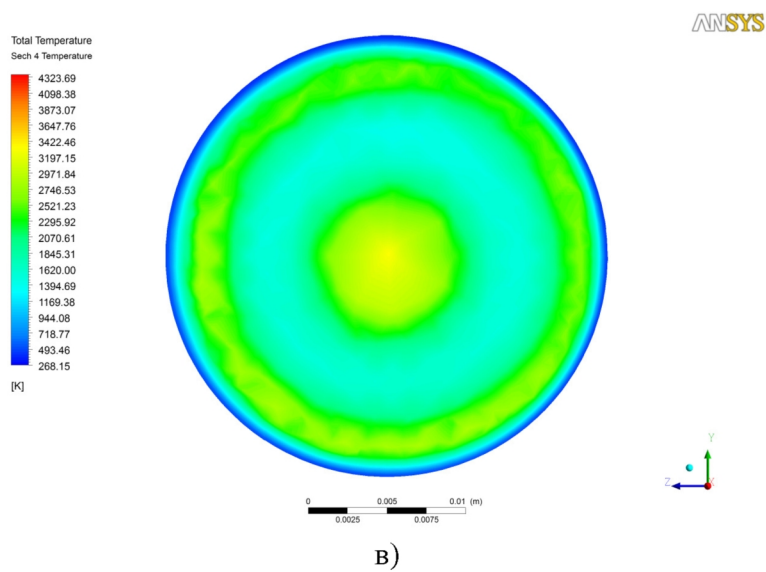
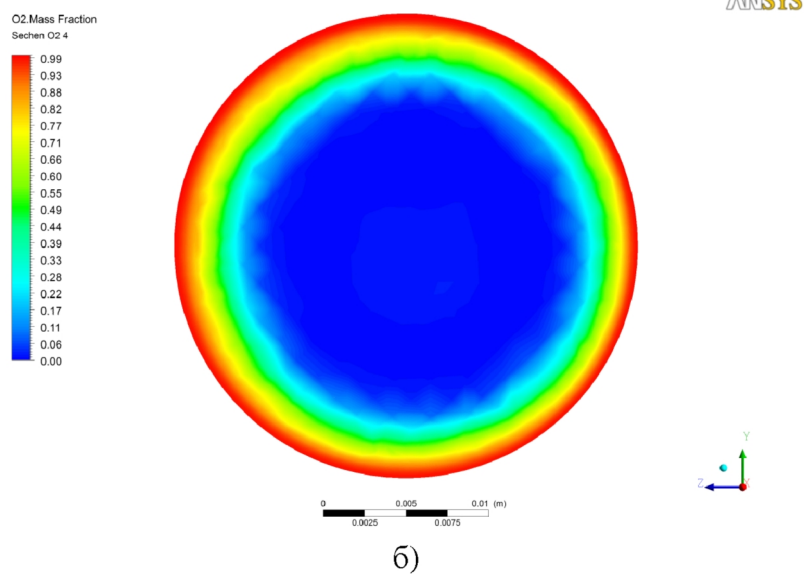
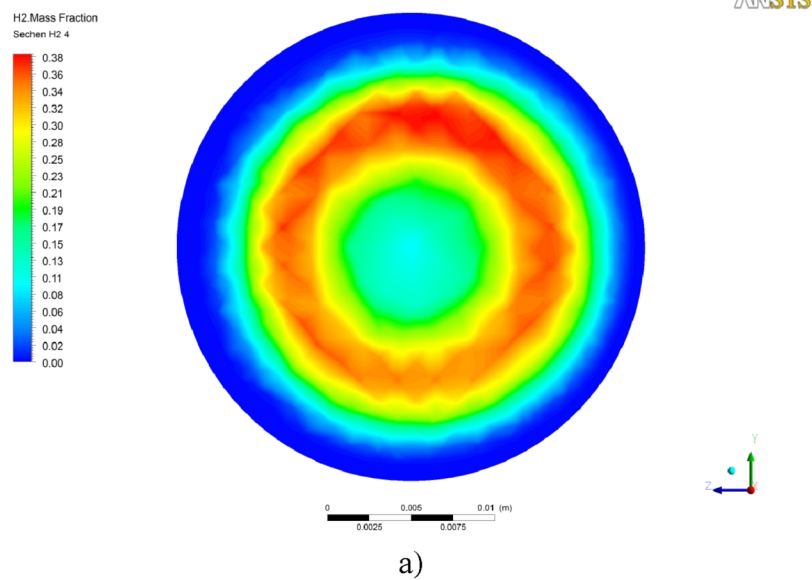
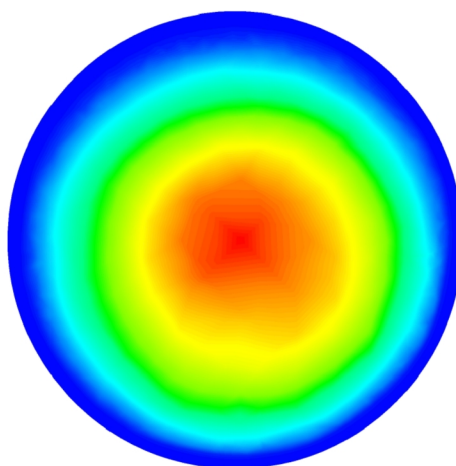
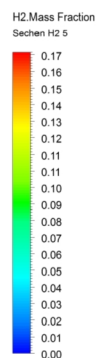
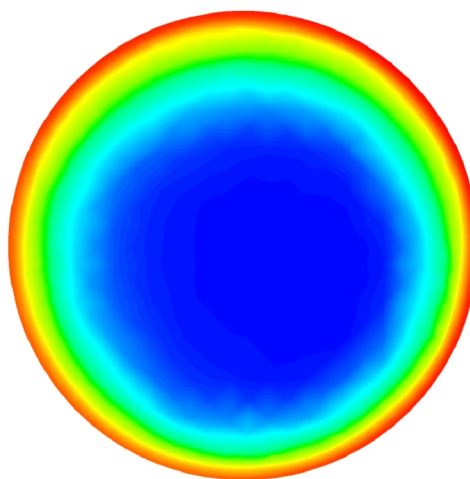
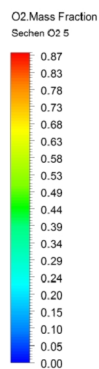


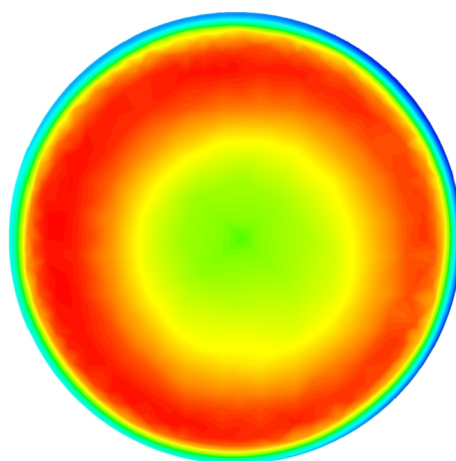
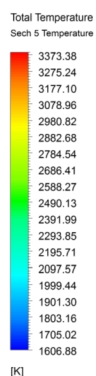
Рисунок 2.18 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 4 тракта камеры ЖРД



a)

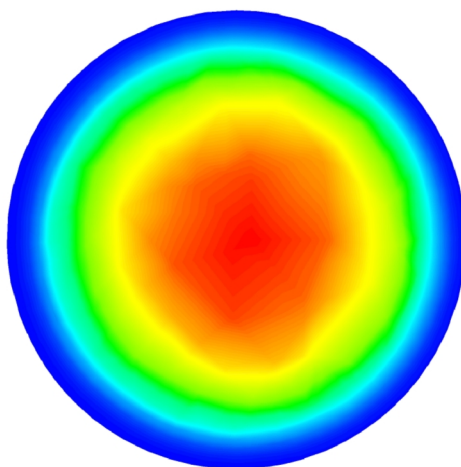
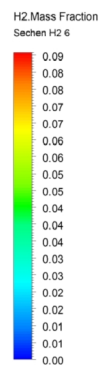


б)

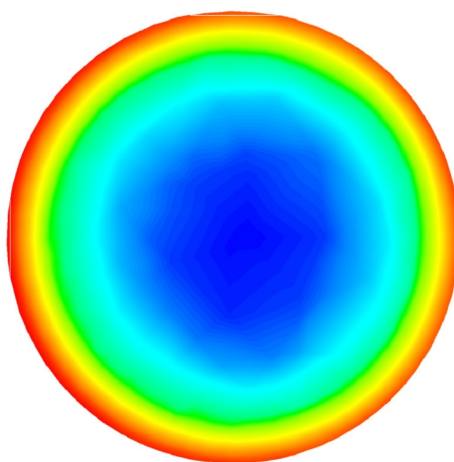
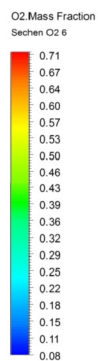


в)

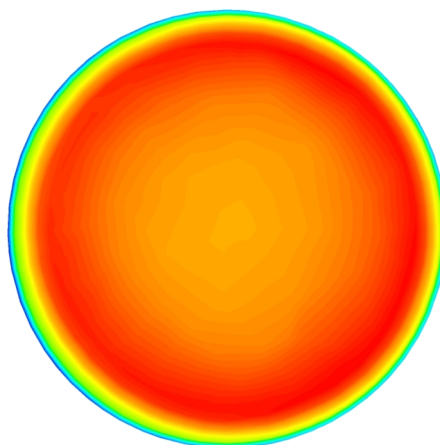
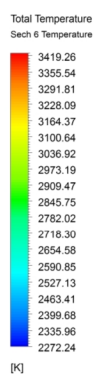
Рисунок 2.19 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 5 тракта камеры ЖРД



a)



б)



в)

Рисунок 2.20 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении б тракта камеры ЖРД

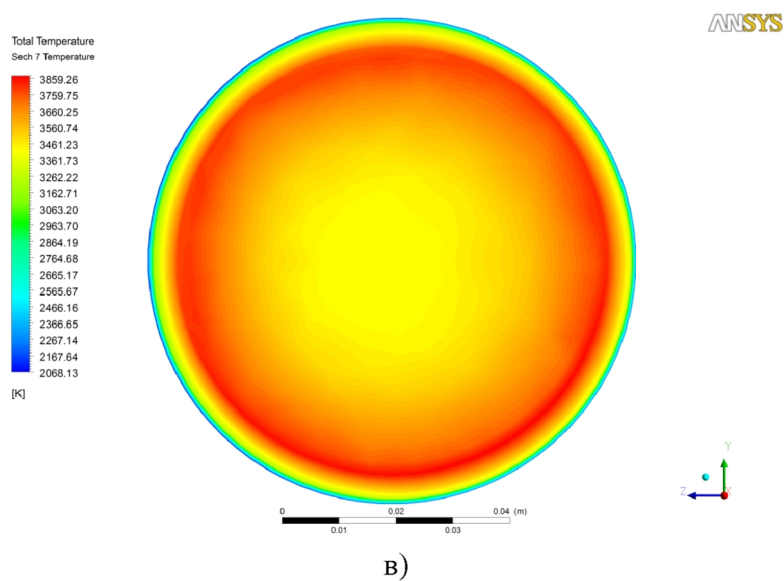
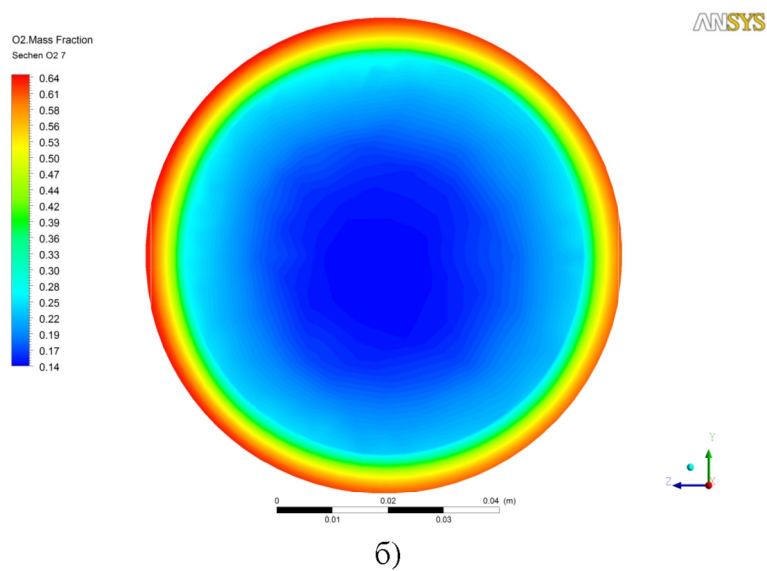
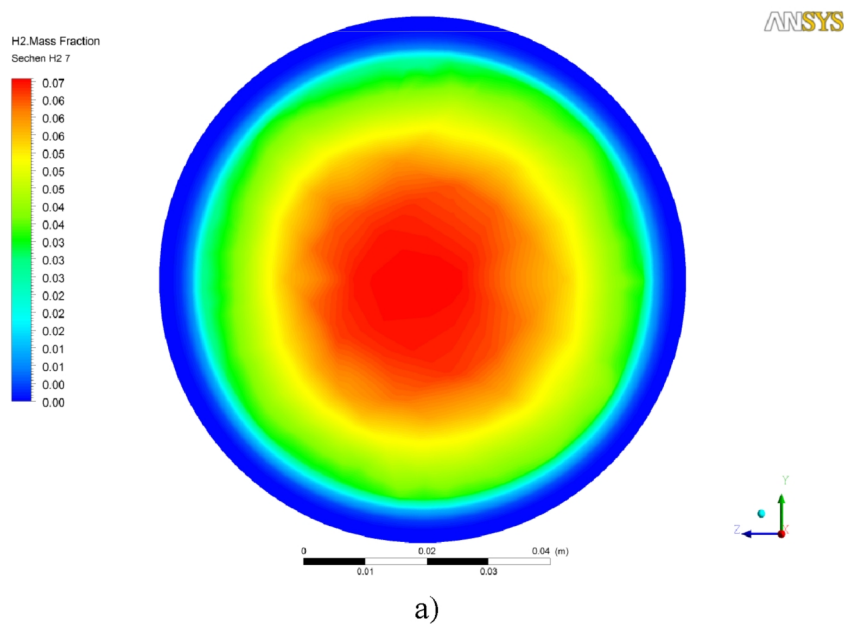
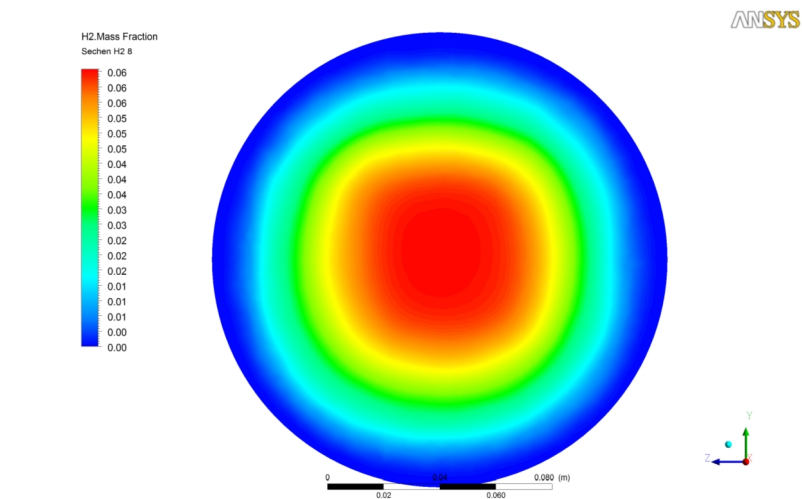
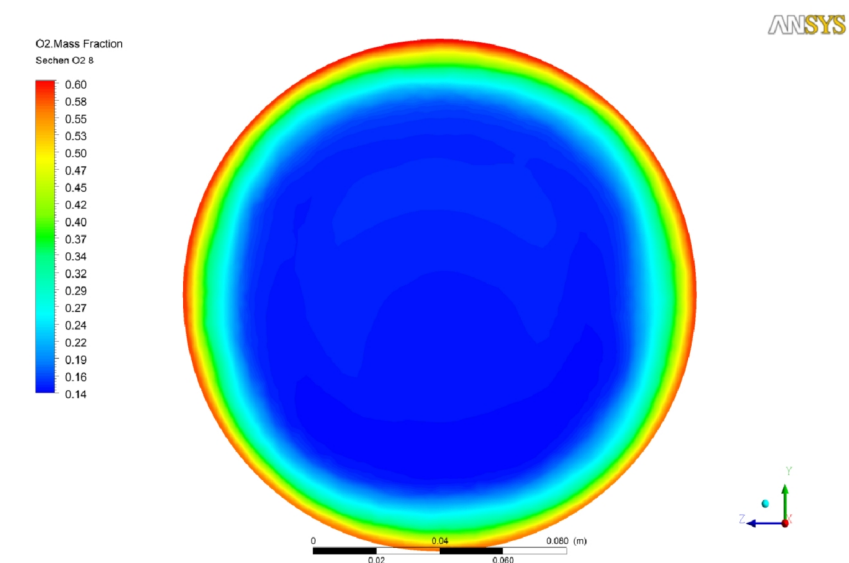


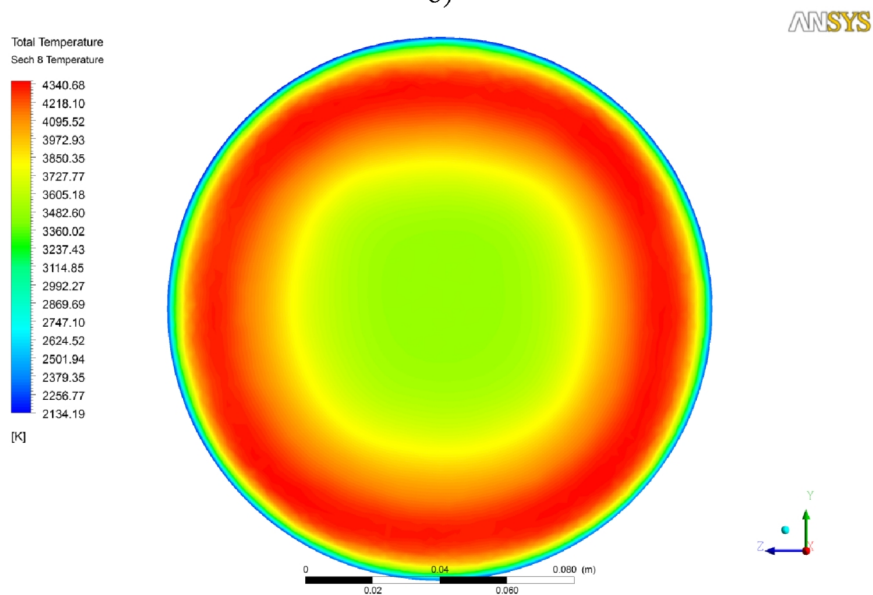
Рисунок 2.21 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 7 тракта камеры ЖРД



a)



б)



в)

Рисунок 2.22 – Распределение концентрации водорода а), кислорода б) и полной температуры продуктов сгорания в) в сечении 8 тракта камеры ЖРД

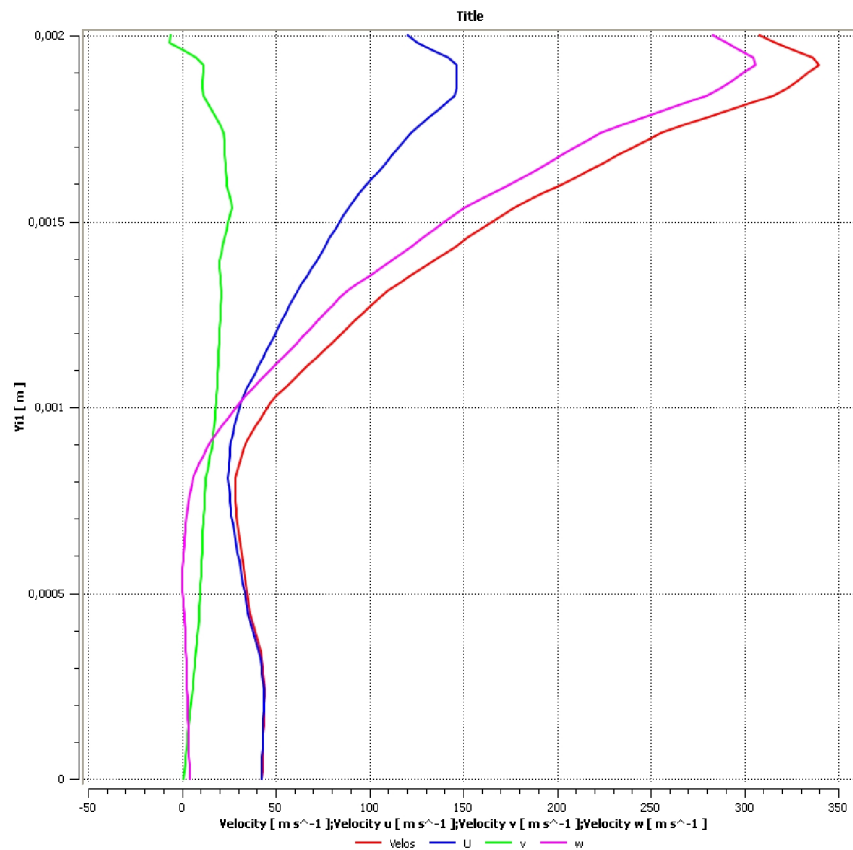


Рисунок 2.23 – Эпюра скорости продуктов сгорания и ее составляющих в сечении 1 тракта камеры ЖРД

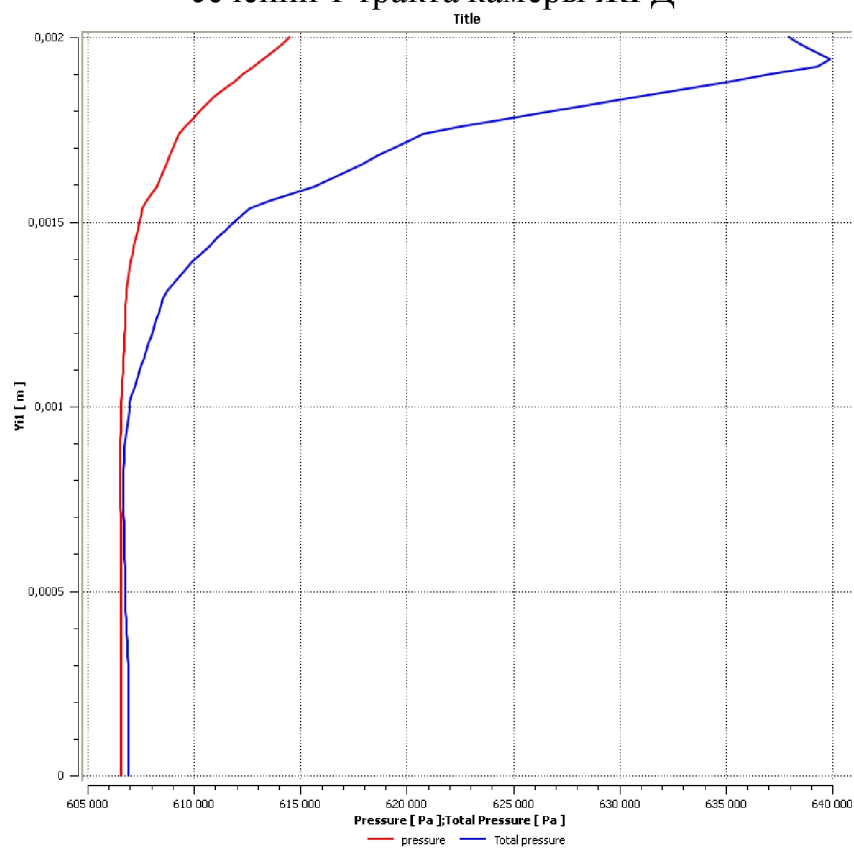


Рисунок 2.24 – Эпюра статического и полного давления продуктов сгорания в сечении 1 тракта камеры ЖРД

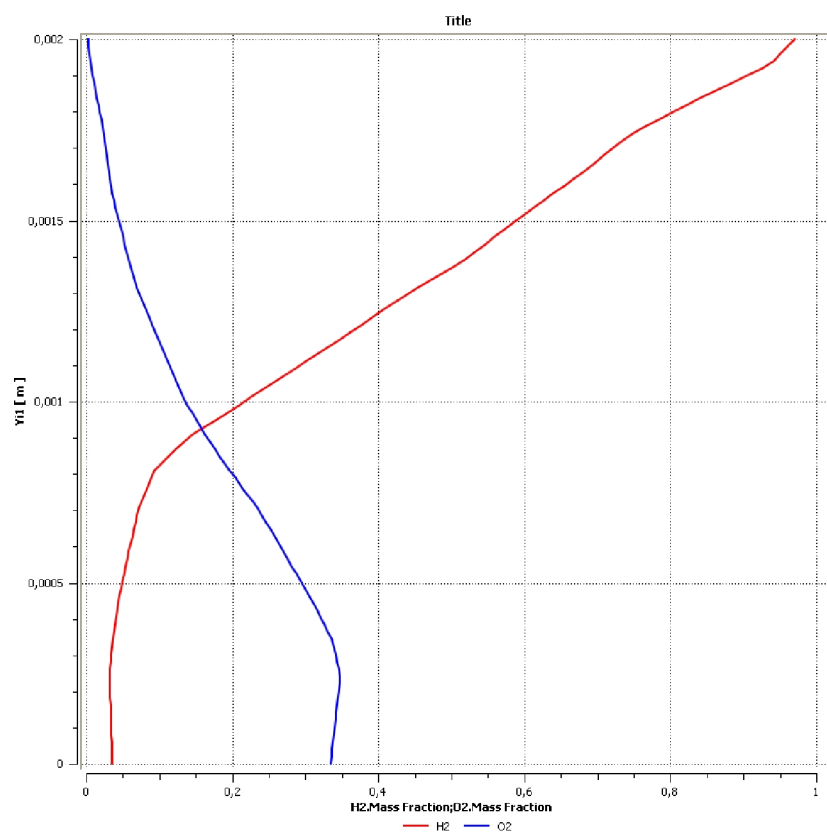


Рисунок 2.25 – Эпюры распределения водорода и кислорода в сечении 1 тракта камеры ЖРД

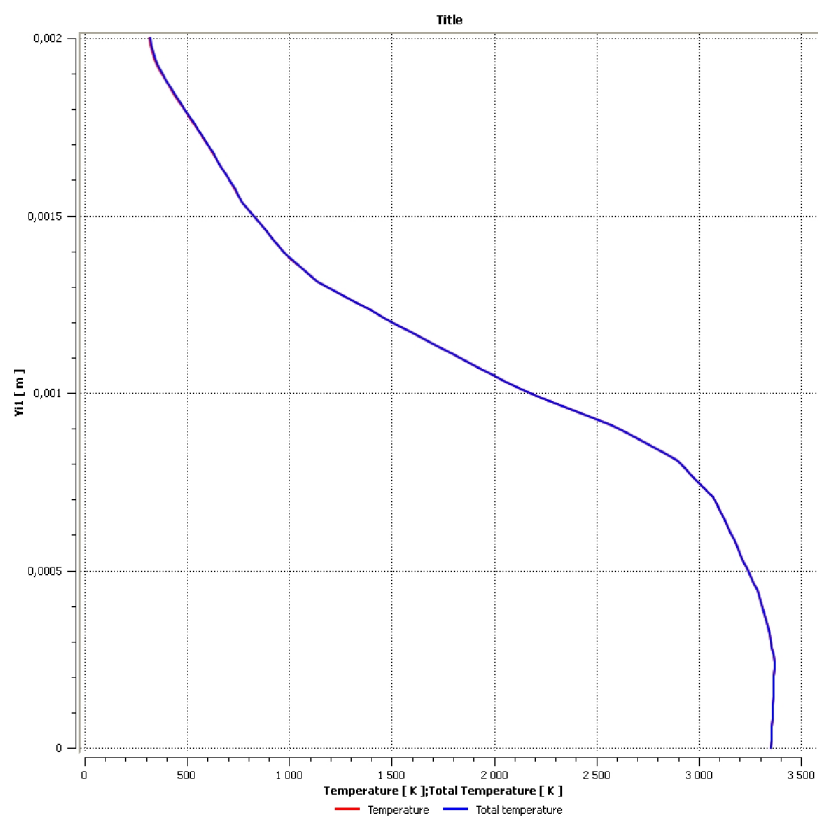


Рисунок 2.26 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 1 тракта камеры ЖРД

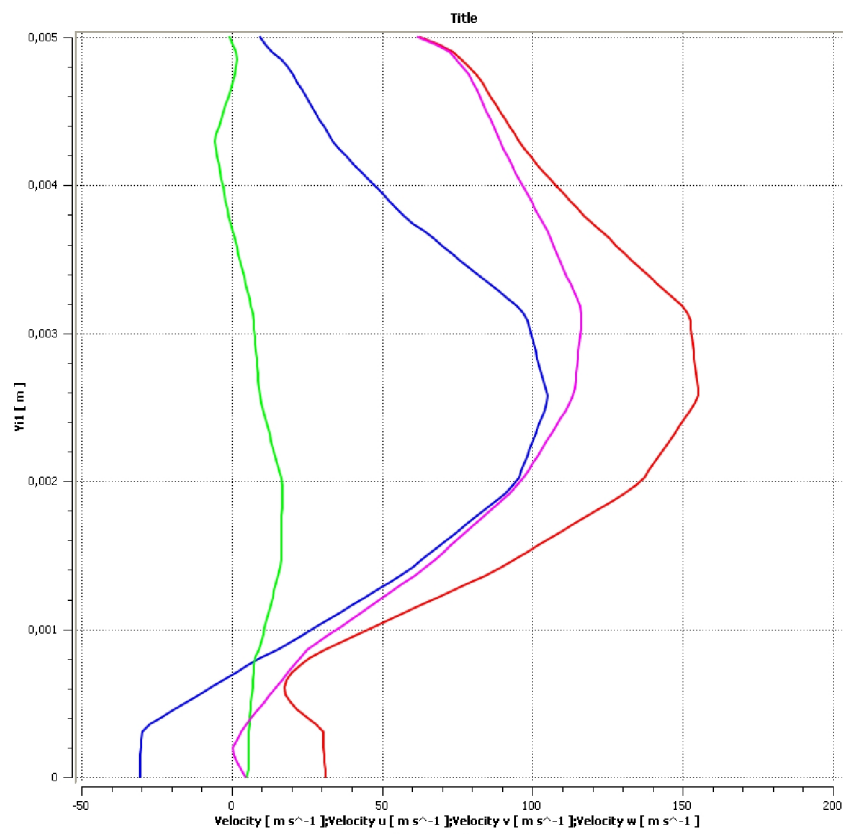


Рисунок 2.27 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 2 тракта камеры ЖРД

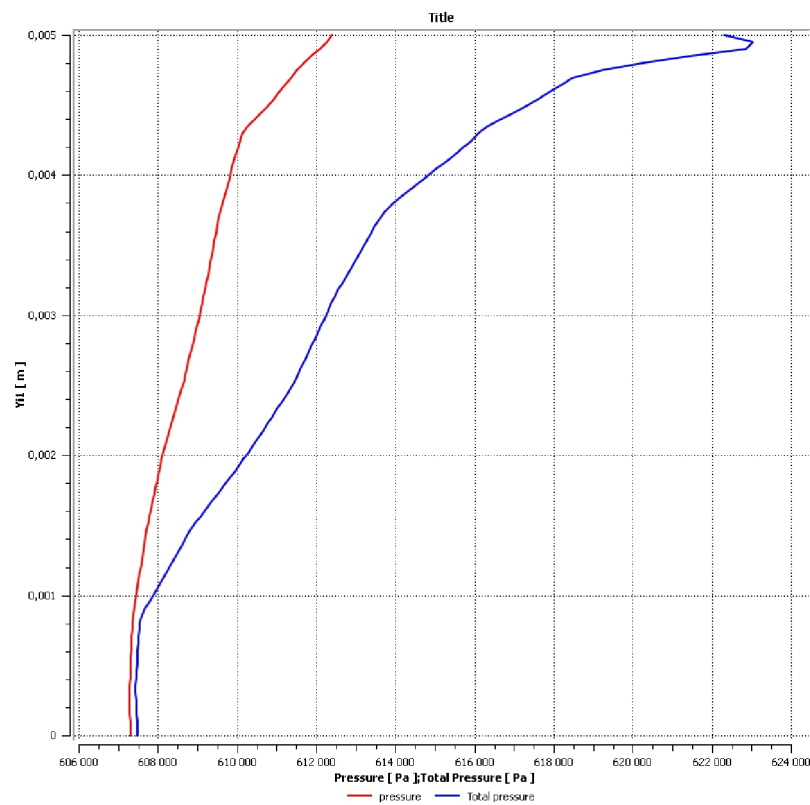


Рисунок 2.28 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 2 тракта камеры ЖРД

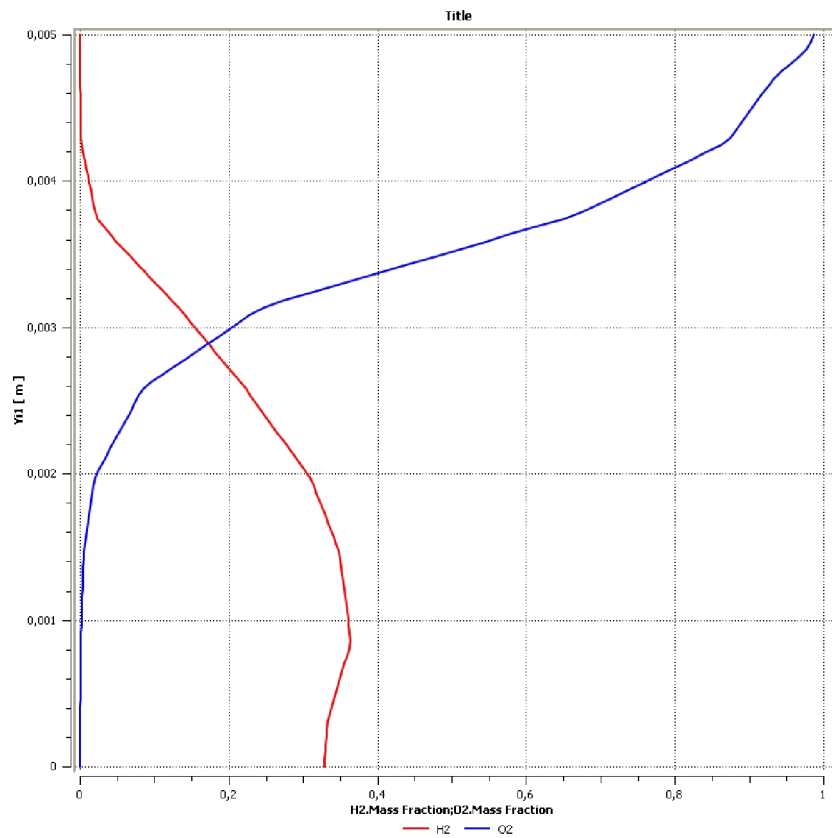


Рисунок 2.29 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 2 тракта камеры ЖРД

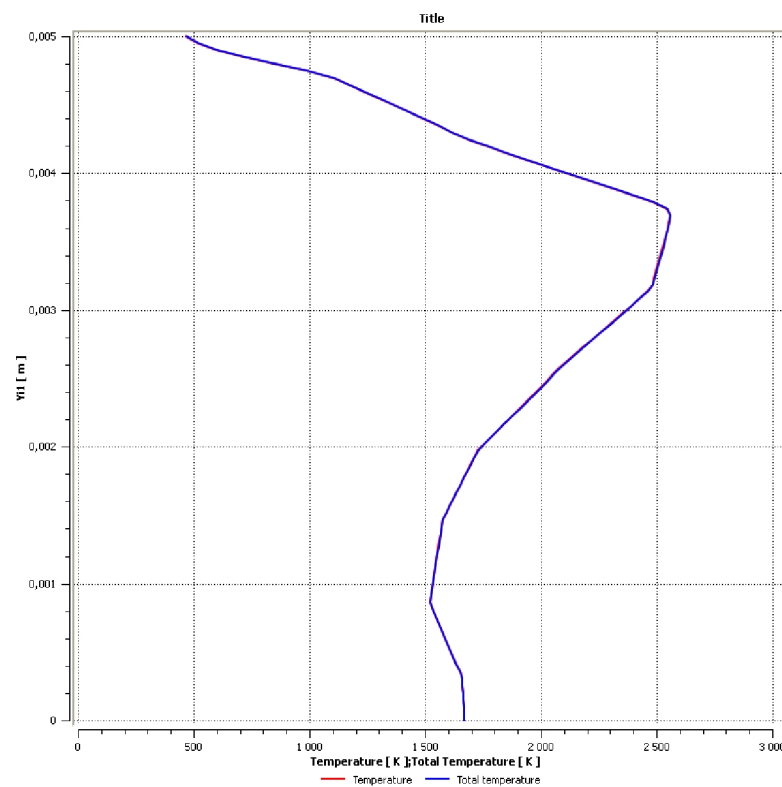


Рисунок 2.30 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 2 тракта камеры ЖРД

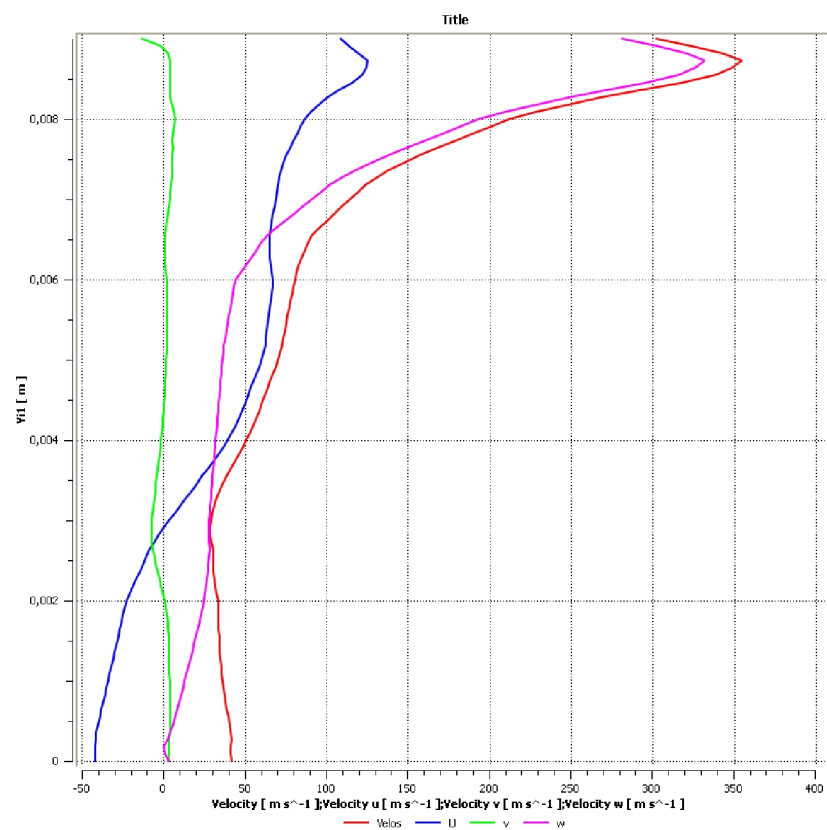


Рисунок 2.31 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 3 тракта камеры ЖРД

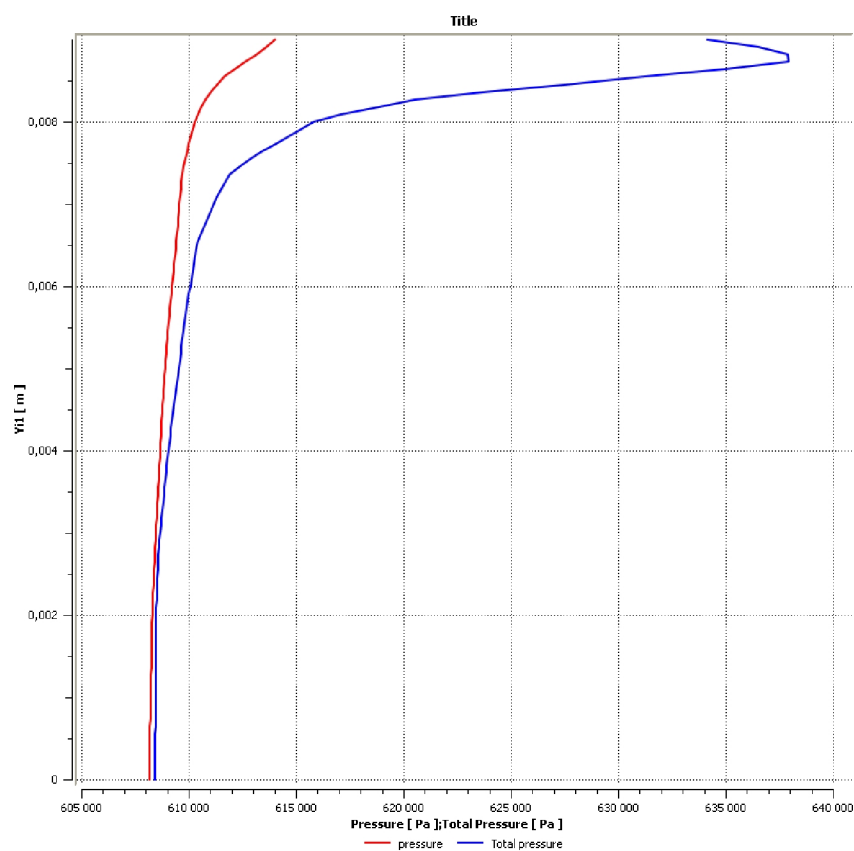


Рисунок 2.32 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 3 тракта камеры ЖРД

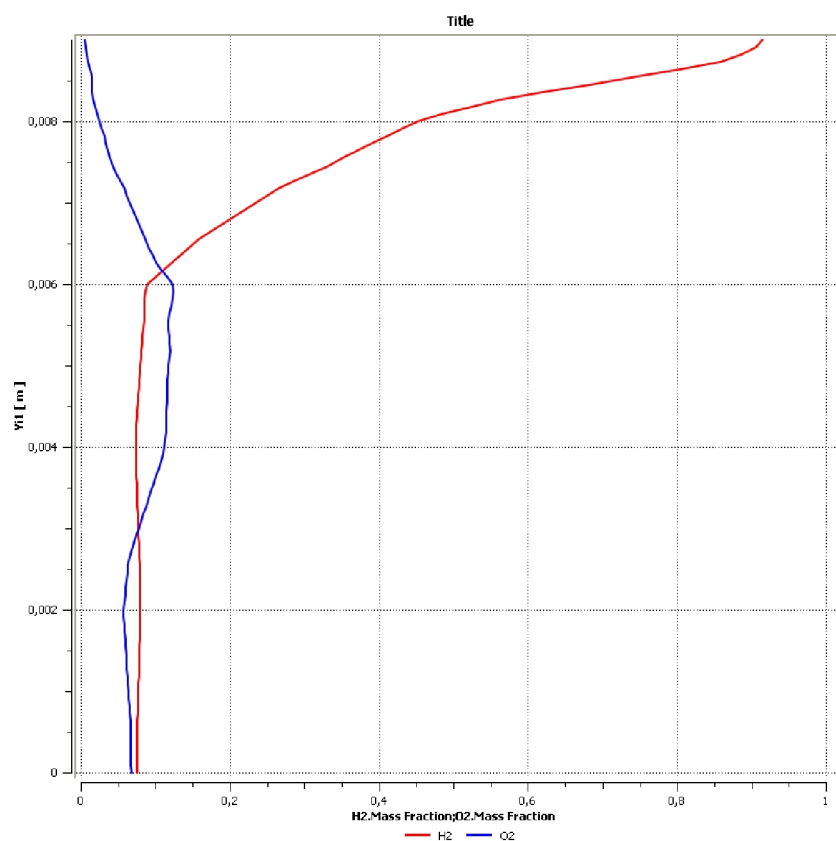


Рисунок 2.33 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 3 тракта камеры ЖРД

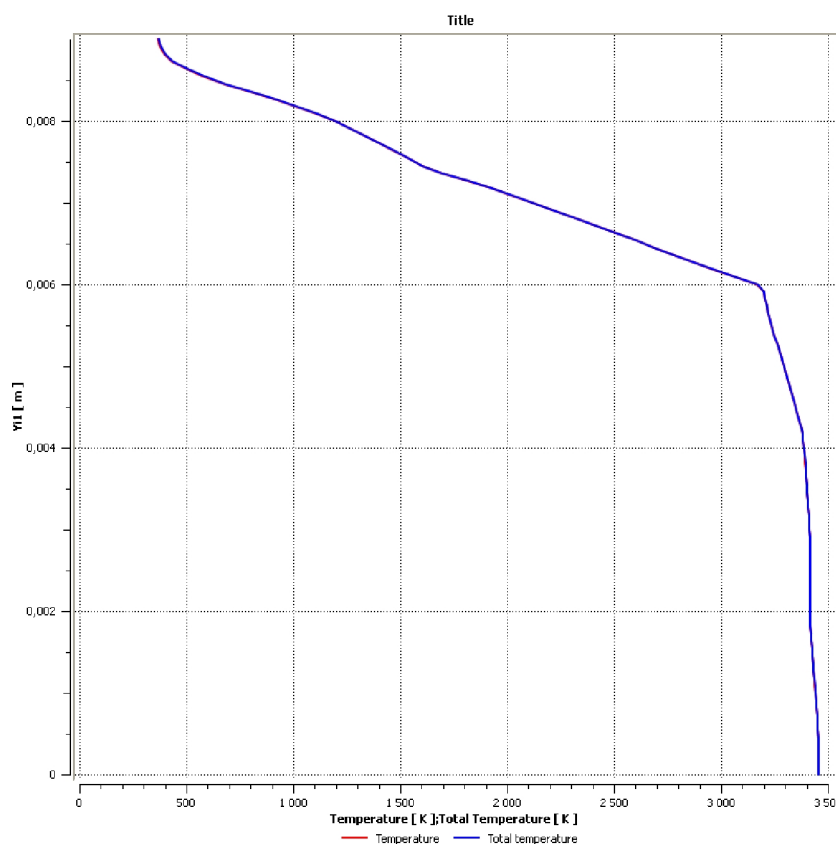


Рисунок 2.34 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 3 тракта камеры ЖРД

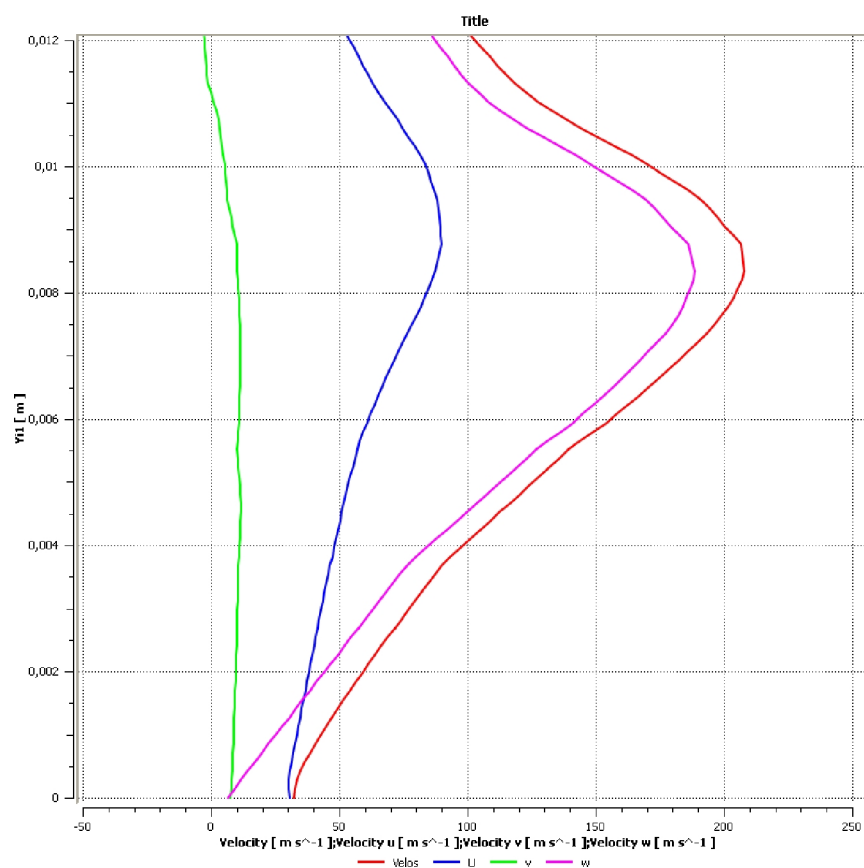


Рисунок 2.35 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 4 тракта камеры ЖРД

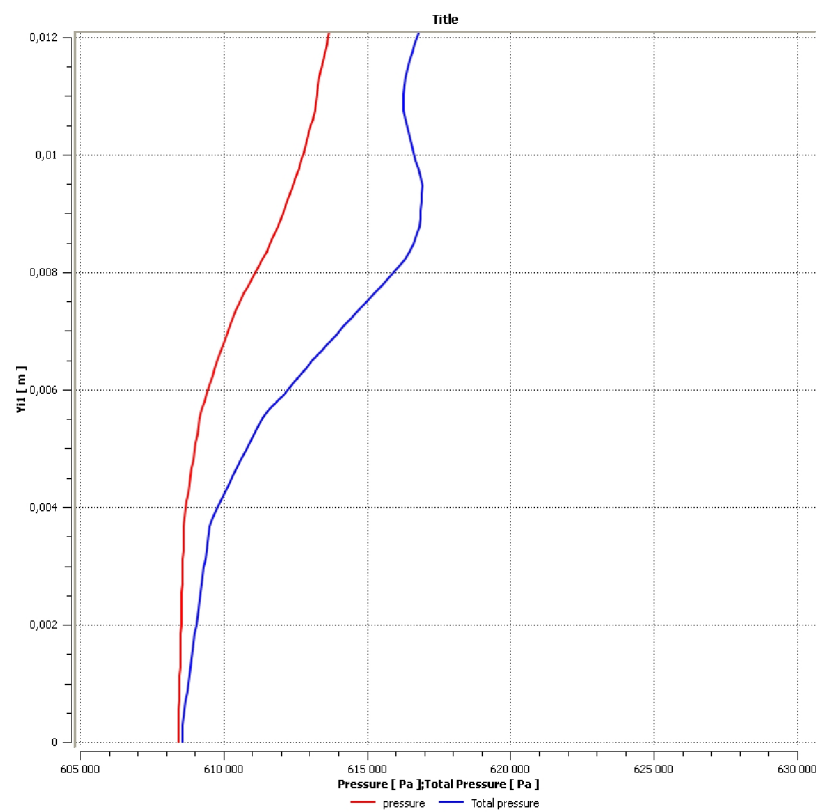


Рисунок 2.36 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 4 тракта камеры ЖРД

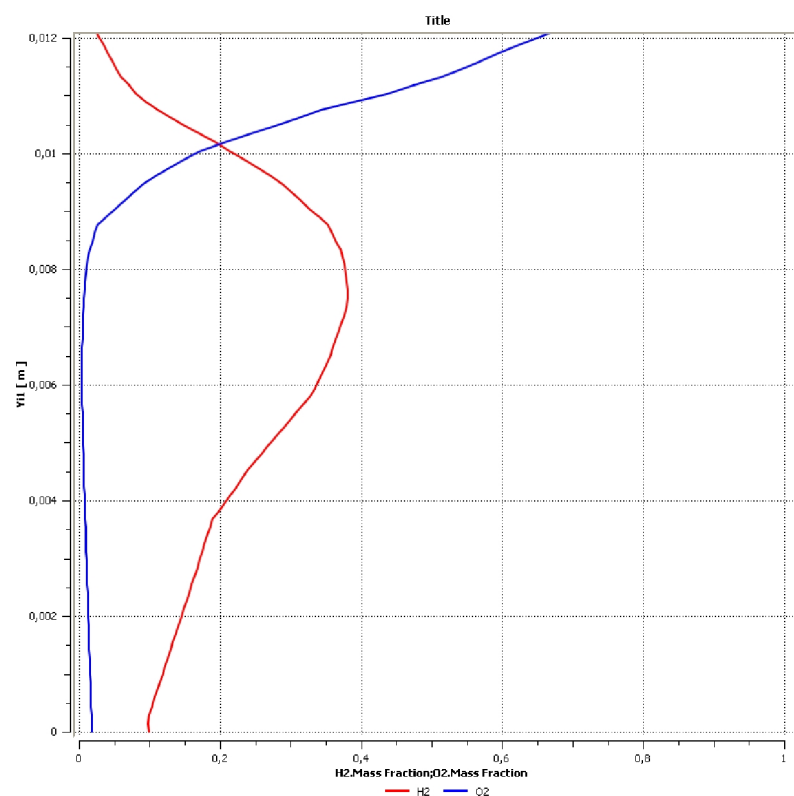


Рисунок 2.37 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 4 тракта камеры ЖРД

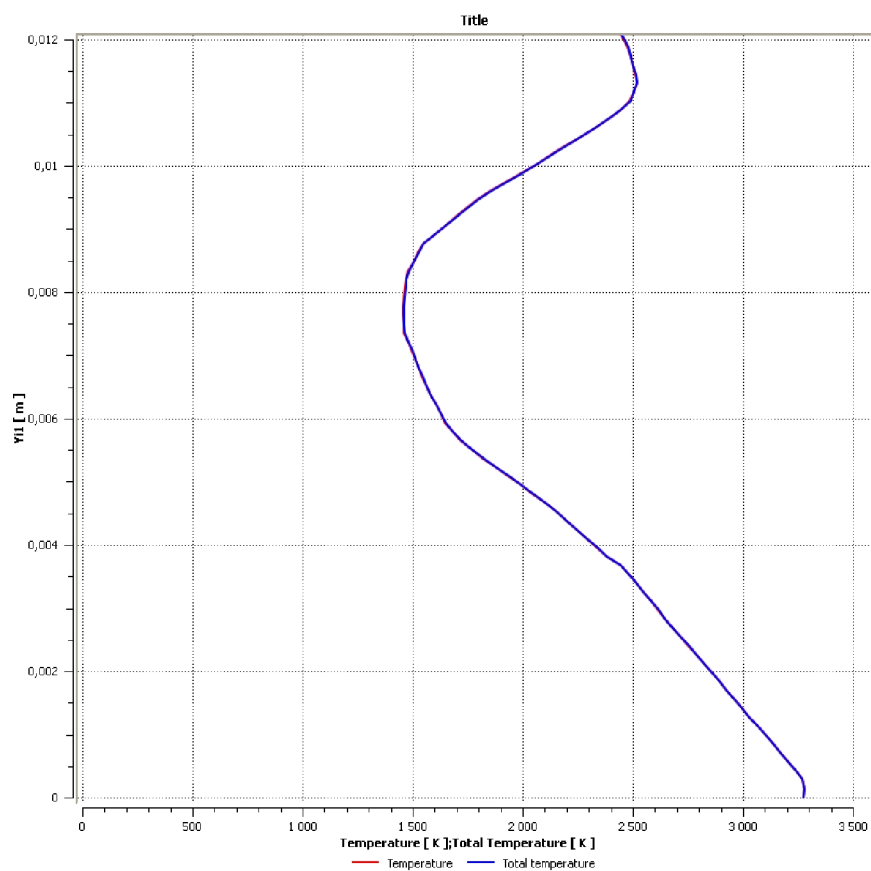


Рисунок 2.38 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 4 тракта камеры ЖРД

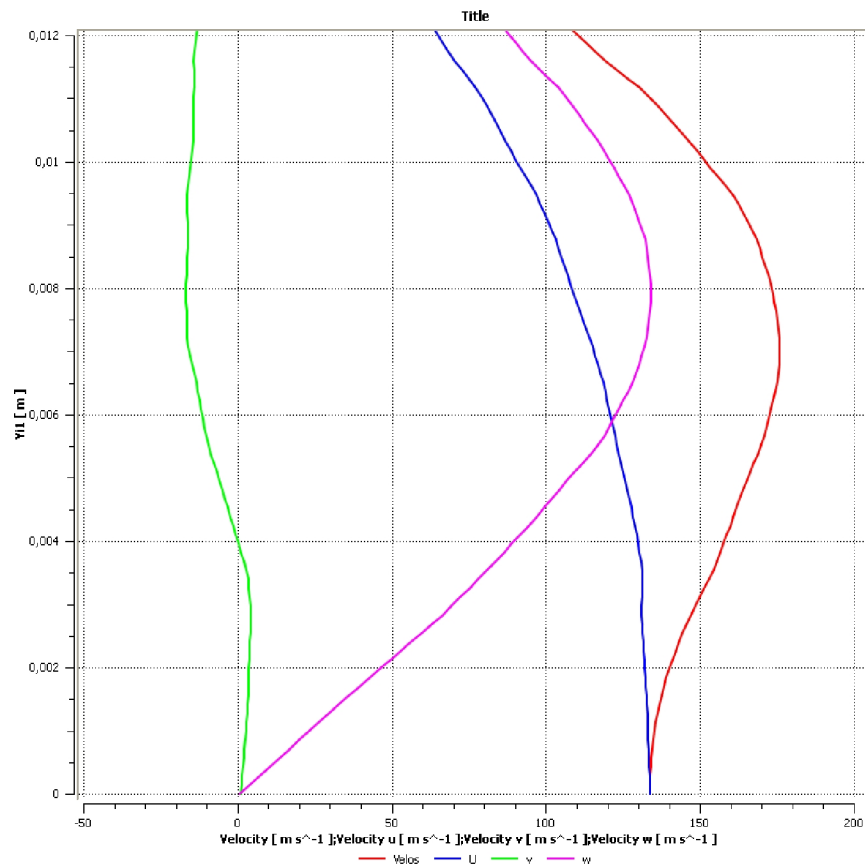


Рисунок 2.39 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 5 тракта камеры ЖРД

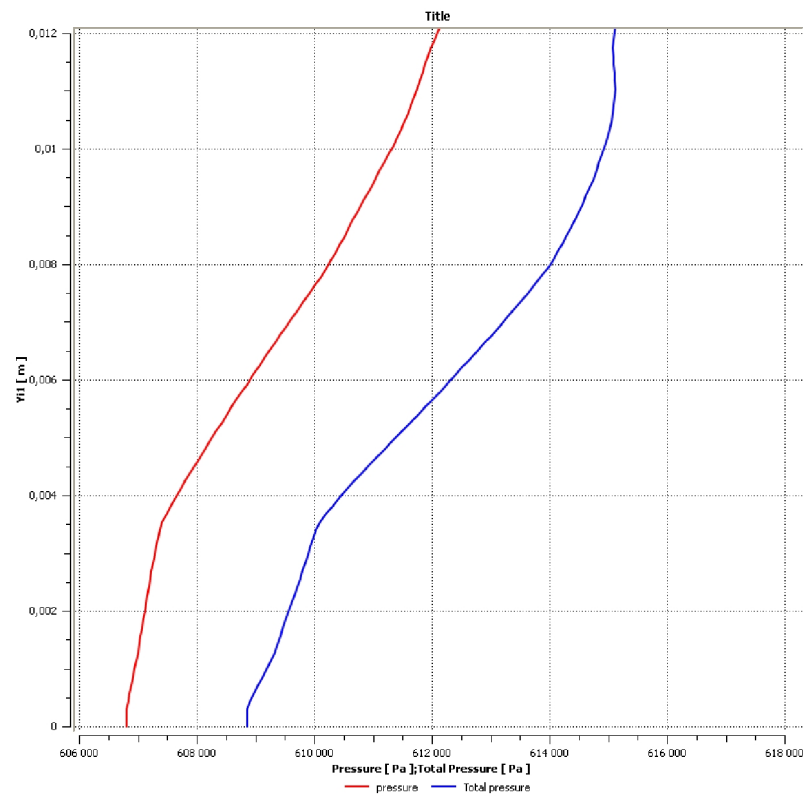


Рисунок 2.40 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 5 тракта камеры ЖРД

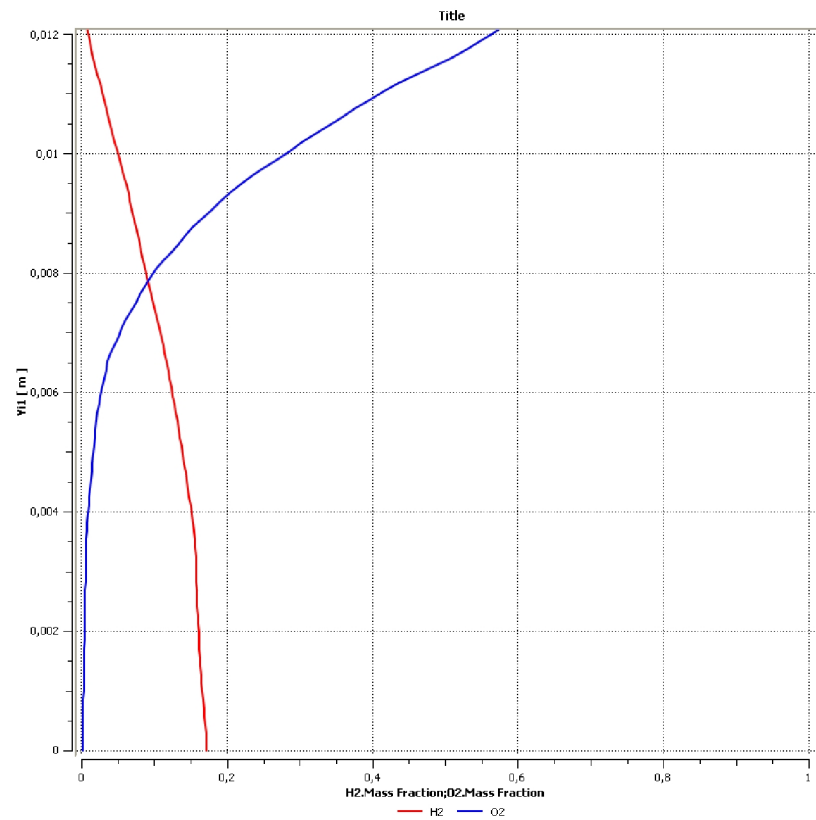


Рисунок 2.41 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 5 тракта камеры ЖРД

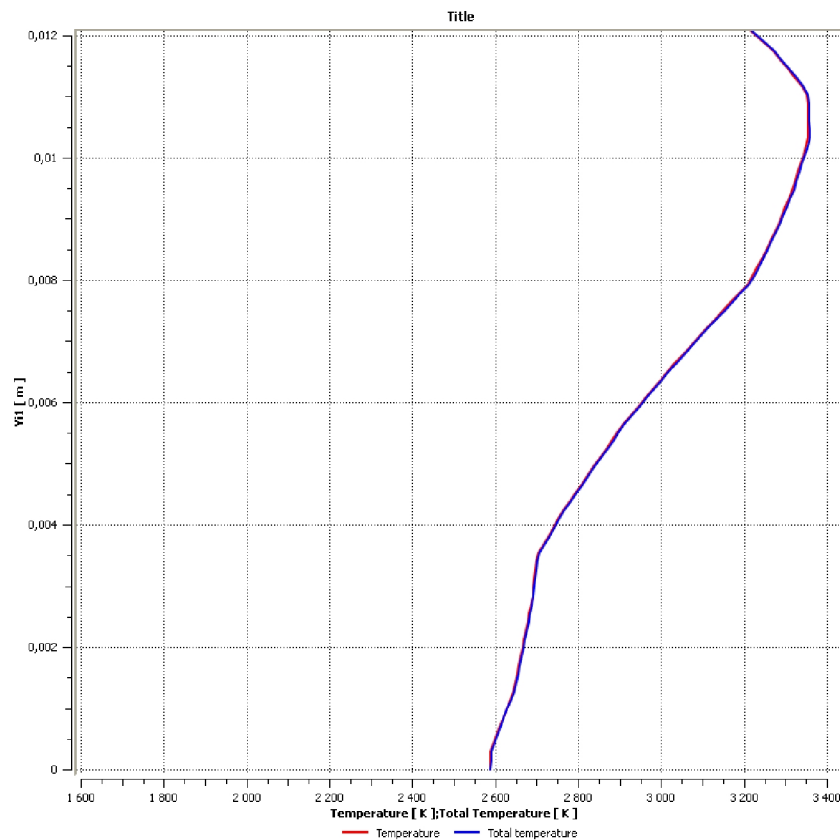


Рисунок 2.42 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 5 тракта камеры ЖРД

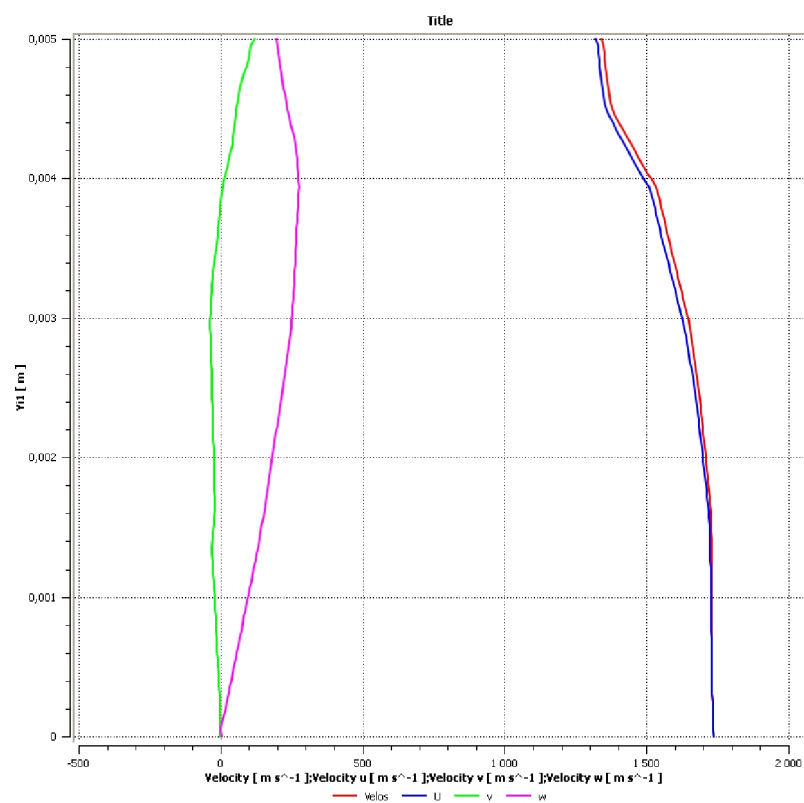


Рисунок 2.43 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 6 тракта камеры ЖРД

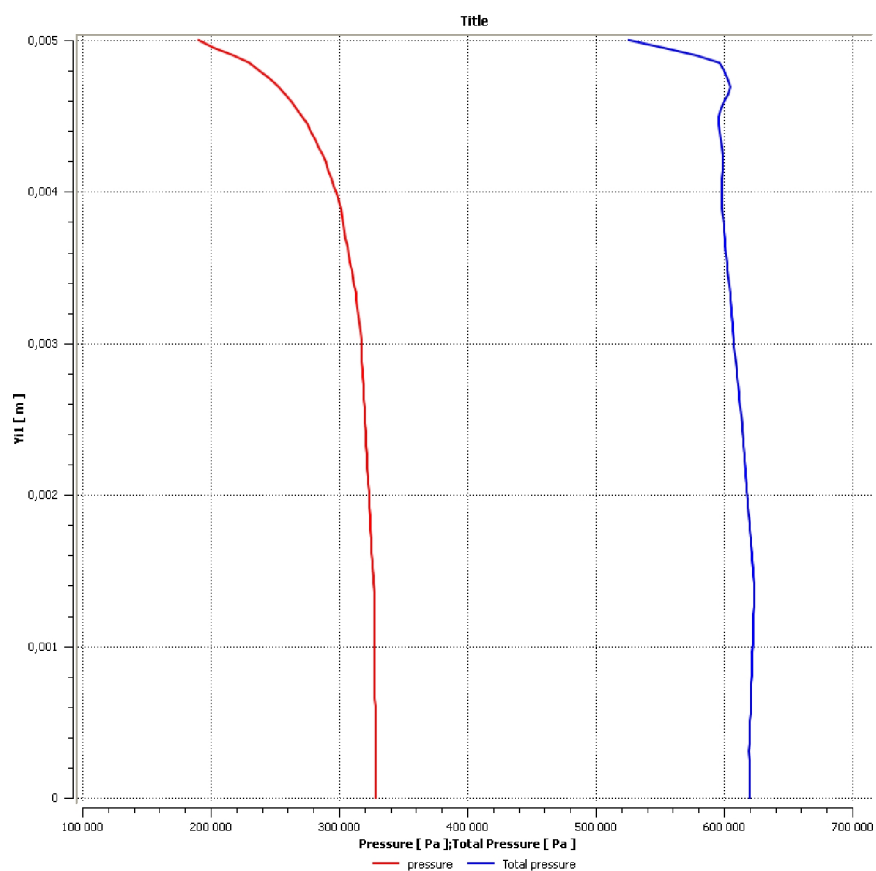


Рисунок 2.44 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 6 тракта камеры ЖРД

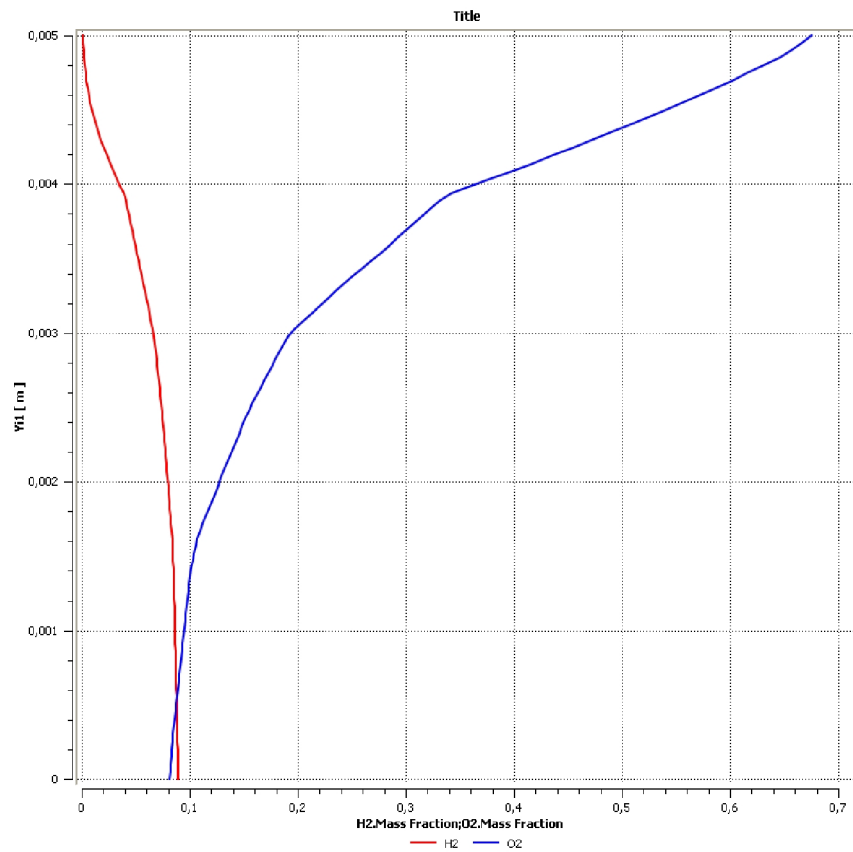


Рисунок 2.45 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 6 тракта камеры ЖРД

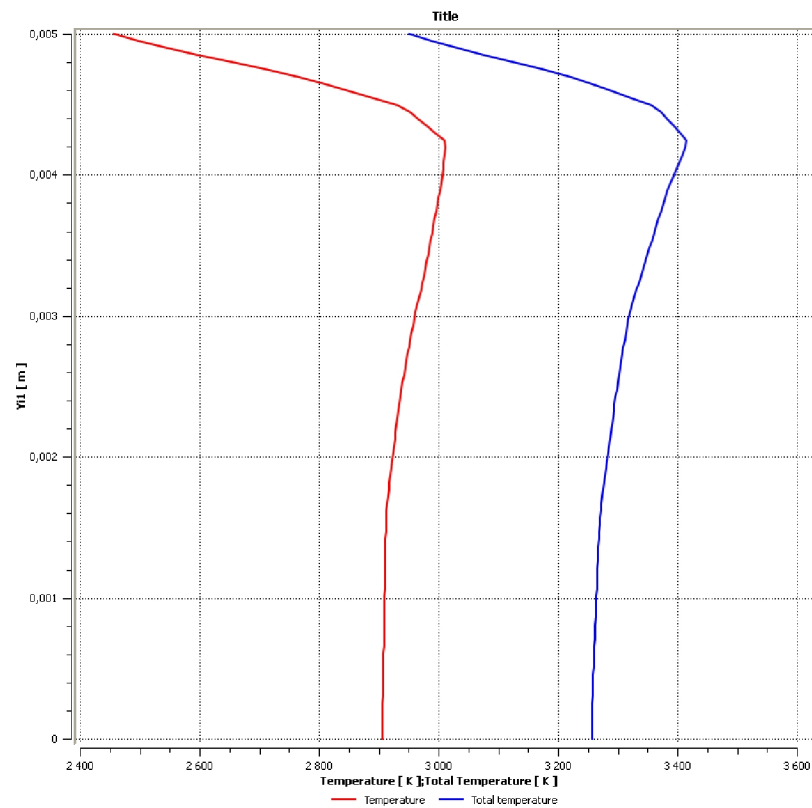


Рисунок 2.46 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 6 тракта камеры ЖРД

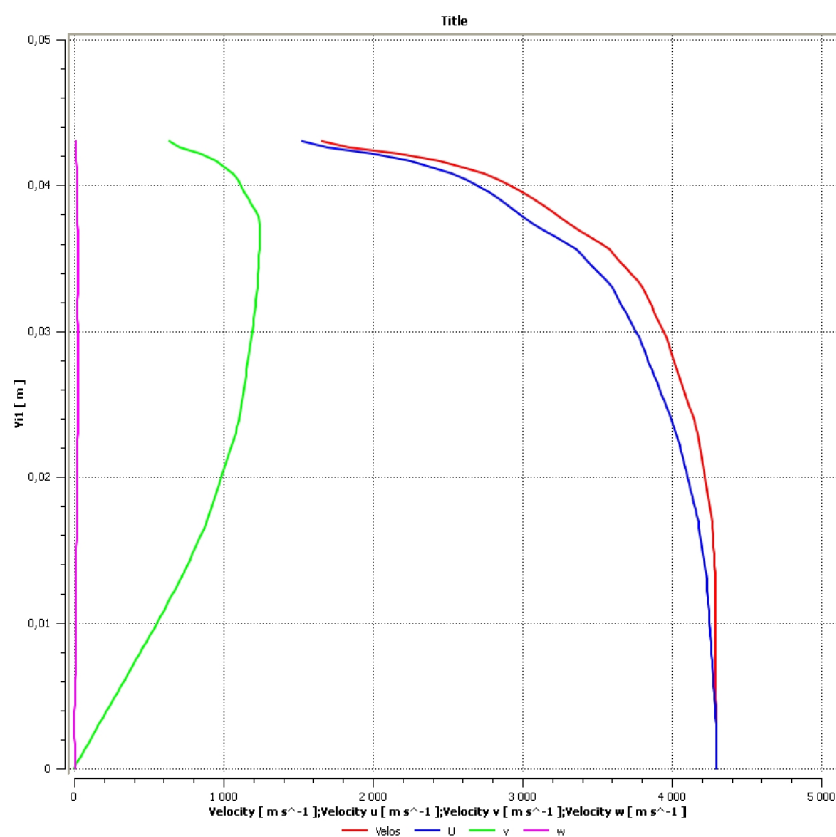


Рисунок 2.47 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 7 тракта камеры ЖРД

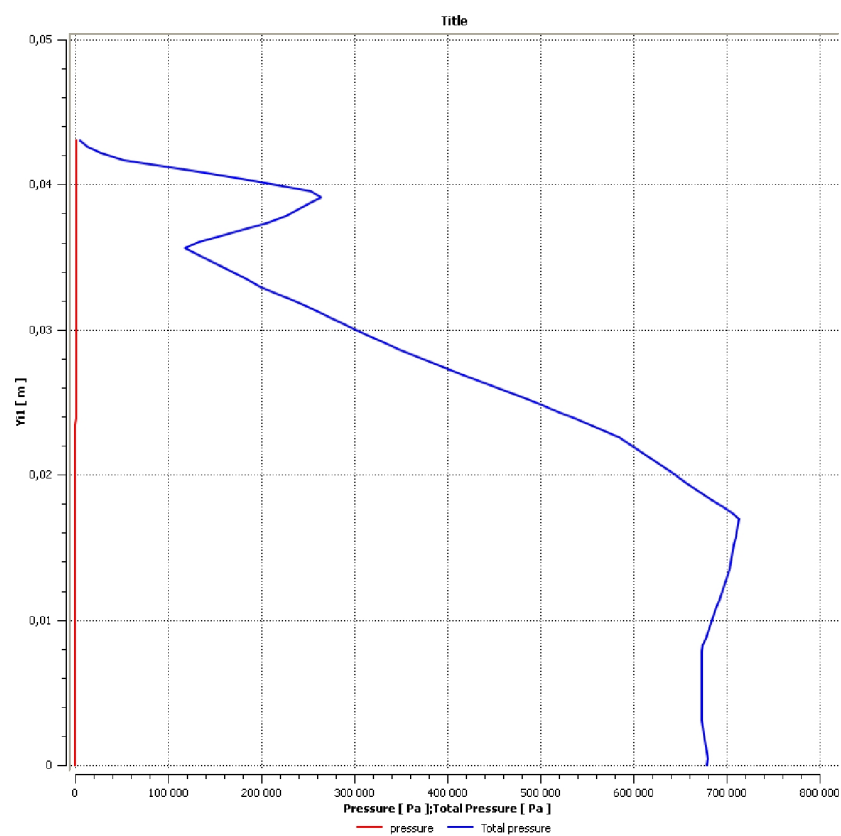


Рисунок 2.48 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 7 тракта камеры ЖРД

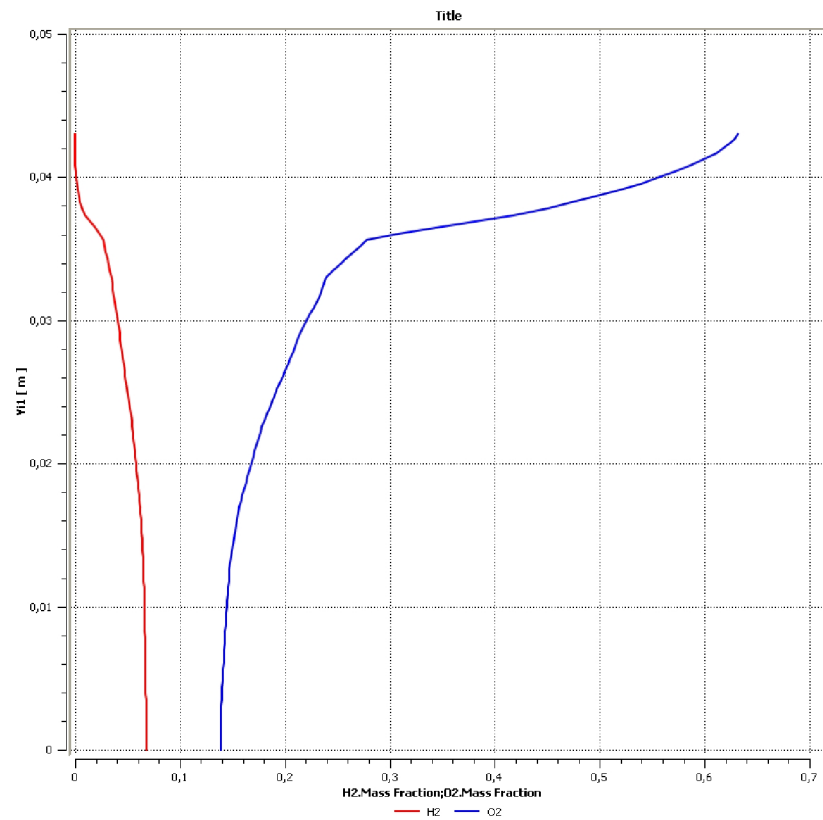


Рисунок 2.49 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 7 тракта камеры ЖРД

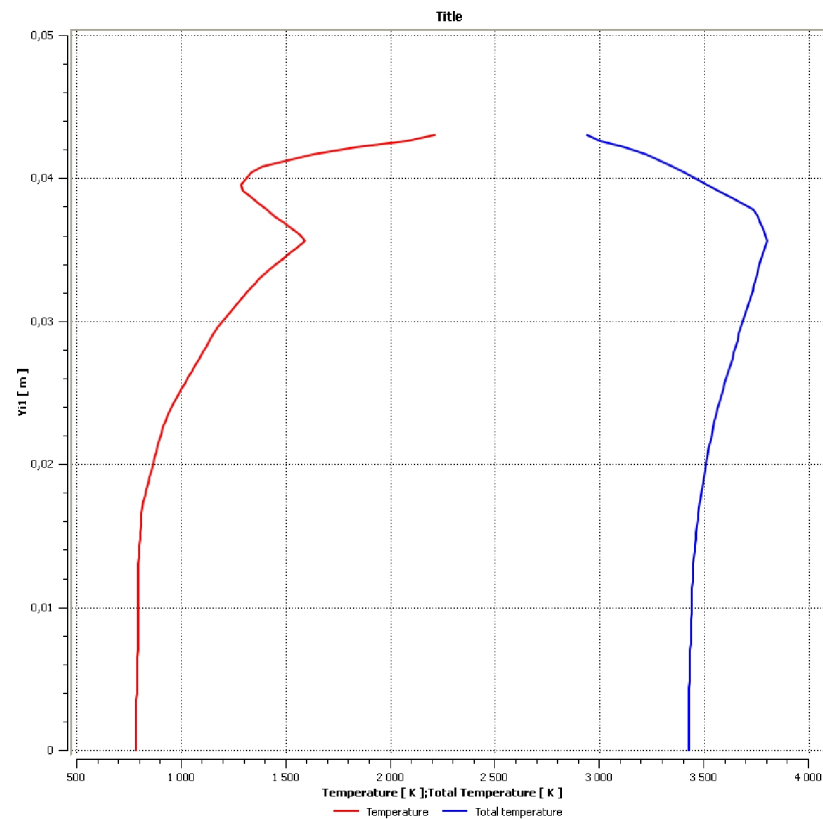


Рисунок 2.50 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 7 тракта камеры ЖРД

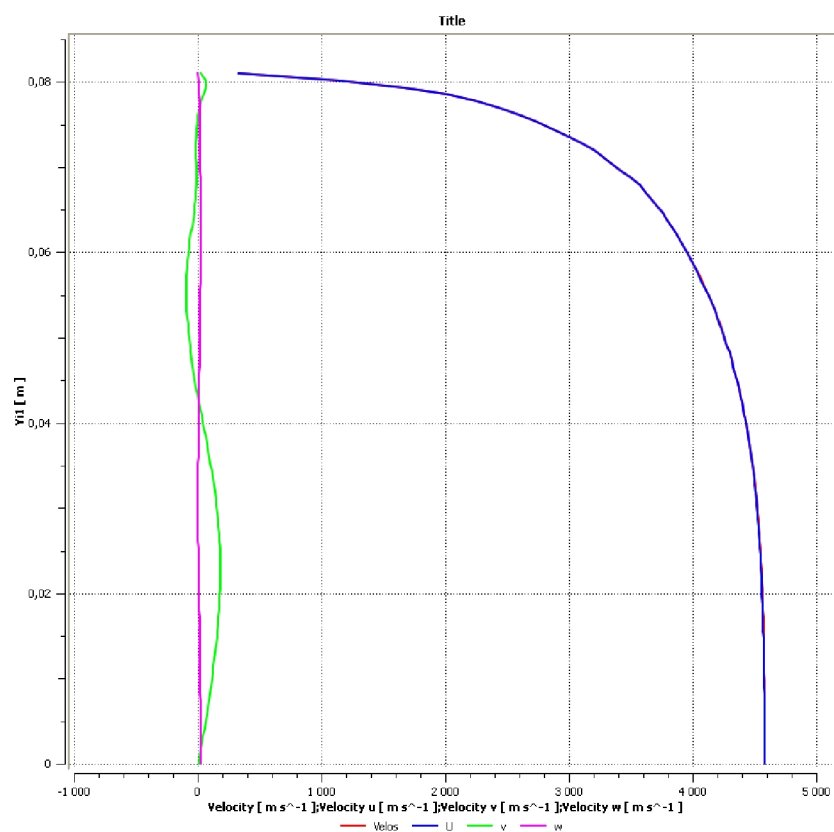


Рисунок 2.51 – Эпюры скорости продуктов сгорания в сечении 8 тракта камеры ЖРД

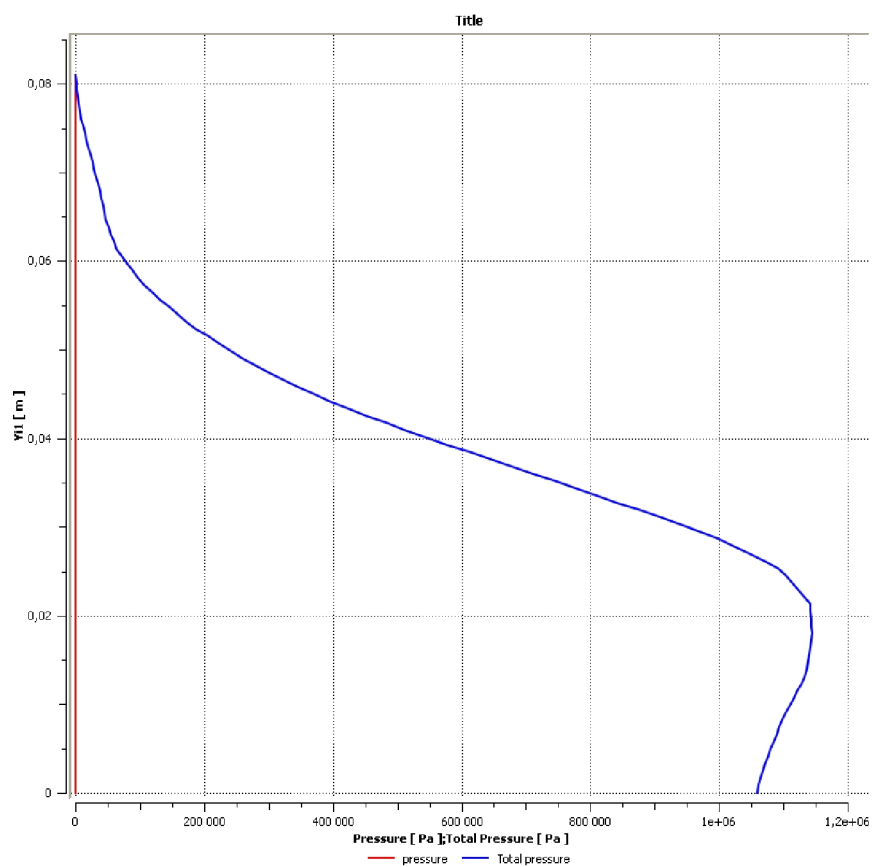


Рисунок 2.52 – Эпюры давления продуктов сгорания в сечении 8 тракта камеры ЖРД

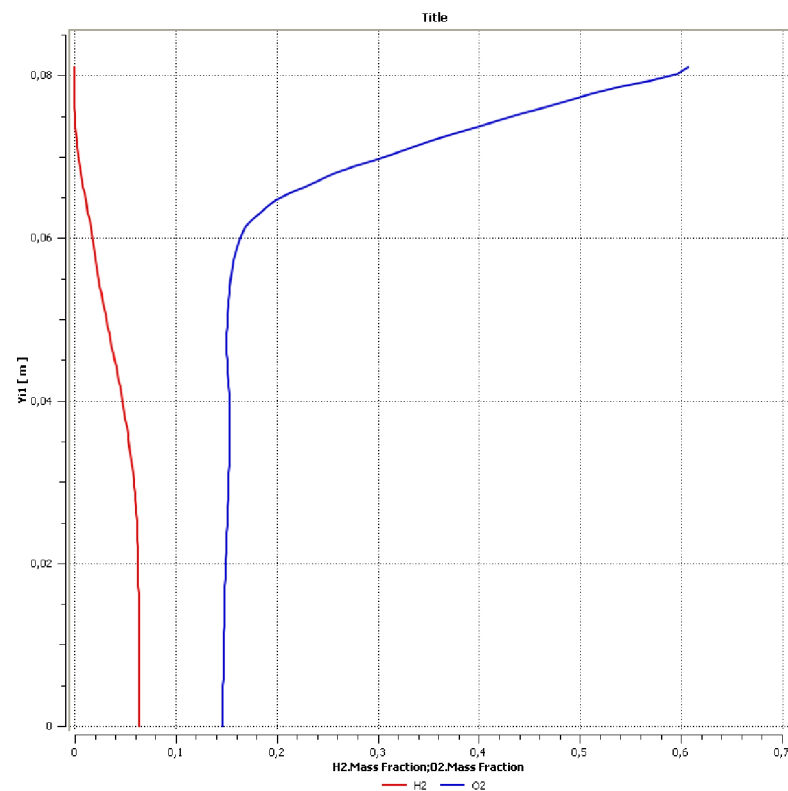


Рисунок 2.53 – Эпюры концентрации водорода и кислорода в сечении 8 тракта камеры ЖРД

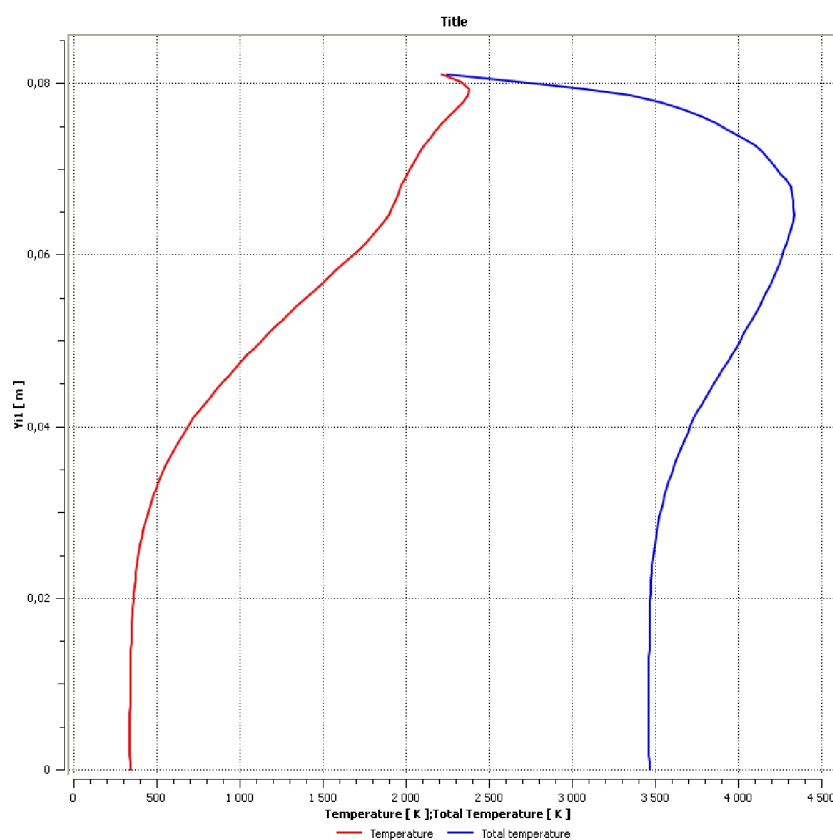


Рисунок 2.54 – Эпюры статической и полной температуры продуктов сгорания в сечении 8 тракта камеры ЖРД

каждом из восьми сечений тракта камеры двигателя показано изменение скорости и её составляющих, статического и полного давлений, концентраций компонентов топлива, статической и полной температуры. Распределение каждого из параметров u , p , ρ , T и ξ имеет самостоятельное значение и характеризует с той или иной стороны рабочий процесс в камере сгорания и сопле.

С точки зрения формирования энергетических параметров ЖРД наибольший интерес представляют численные значения и форма эпюры полной температуры (как результат эффективности процесса смесеобразования и полного выделения энергии при взаимодействии и горении компонентов топлива). Причем, требования к эпюре температуры заключаются в том, что в центральной области камеры значения температуры должны быть приближенными к максимальным для принятого массового соотношения компонентов топлива, а в области стенки камеры ЖРД не превышать допустимую для выбранного конструкционного материала температуру стенки. Таким образом, профиль полной температуры должен в идеале иметь параболическую форму, обращенный своей выпуклой частью по направлению движения потока продуктов сгорания.

Реализация в ракетном двигателе максимального удельного импульса тяги зависит от формы (полноты) эпюры осевой составляющей скорости продуктов сгорания в выходном сечении сопла Лавала. И в этом смысле важным является деформация распределения скорости от минимального сечения сопла до его среза. На срезе сопла осевая составляющая скорости должна стремиться к своему максимуму соответствующему принятой геометрической степени расширения сопла (степени расширения продуктов сгорания в сопле).

Во всех восьми сечениях тракта камеры ЖРД поля распределения температуры (статической и полной) продуктов сгорания приведены на рисунках 2.26, 2.30, 2.34, 2.38, 2.42, 2.46, 2.50, 2.54.

Рассмотрим часть тракта двигателя от начала цилиндрического участка камеры сгорания до его конечного сечения (4...5) рисунки 2.38, 2.42. На входе в камеру сгорания эпюра полной температуры имеет выпуклую по потоку форму (рисунок 2.34), где в центральной области $T^* \sim 3450\text{K}$, а в районе стенки $T^* \sim 400\text{K}$. ступенчатое изменение тракта и подача окислителя в начальном сечении камеры сгорания деформируют эпюру полной температуры до вида, показанного на рисунке 2.38. Внутрикамерные процессы, турбулентное смешение компонентов, приводят распределение T^* к промежуточному состоянию (рисунок 2.42). Завершение формирования поля полной температуры в конфузорной части сопла позволяет получить эпюры статической и полной температур как показано на рисунке 2.46.

Далее по потоку до выходного сечения сопла распределение T^* принципиально не изменяется, характеризуется достаточно высокими значениями T^* в приосевой области течения продуктов сгорания и существенным её снижением в районе стенки сопла.

Следует обратить внимание на распределение скорости продуктов сгорания вдоль тракта двигателя. Опуская анализ трансформации полной скорости и её составляющих в сечениях 1...7, которое представлено на рисунках 2.23, 2.27, 2.31, 2.35, 2.39, 2.43, 2.47, рассмотрим сечение 8 (выходное сечение сопла, рисунок 2.51), где представлены эпюры скорости потока продуктов сгорания. Отметим характерное распределение осевой составляющей скорости, которое прямым образом влияет на формирование удельного импульса тяги ЖРД. В центральной области сечения сопла скорость продуктов сгорания кислородно-водородного топлива достигает $u \sim 4300\text{ м/с}$. В районе стенки сопла отметим существенное её уменьшение.

2.7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВДОЛЬ ОСИ ДВИГАТЕЛЯ.

Распределение газодинамических параметров продуктов сгорания вдоль оси двигателя представлены на рисунках 2.55...2.59. На рисунка 2.55 и

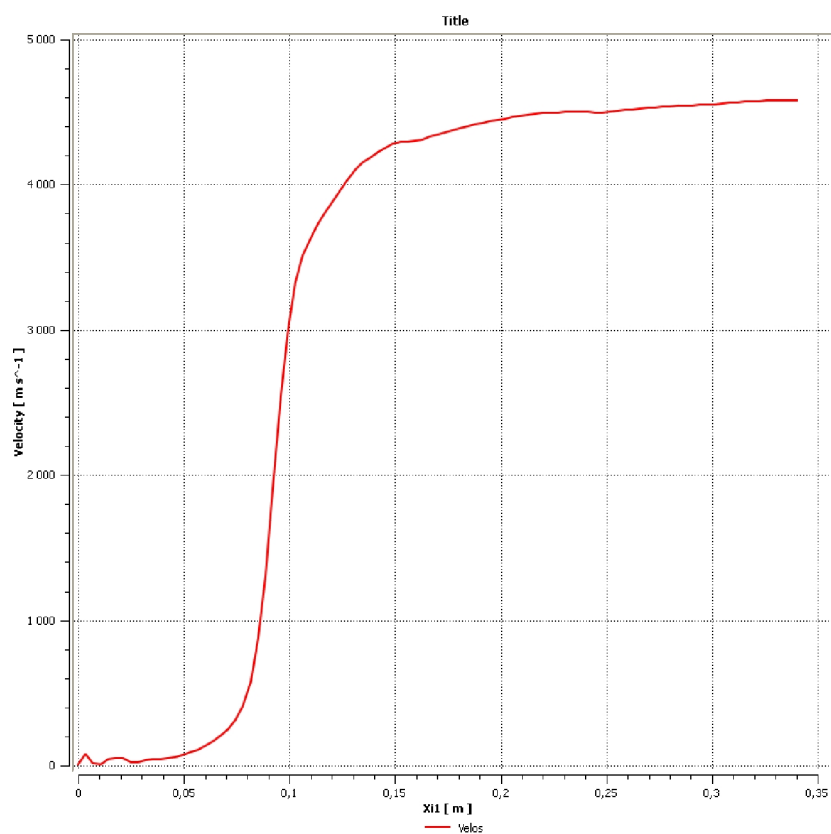


Рисунок 2.55 – Распределение скорости продуктов сгорания по оси тракта камеры ЖРД

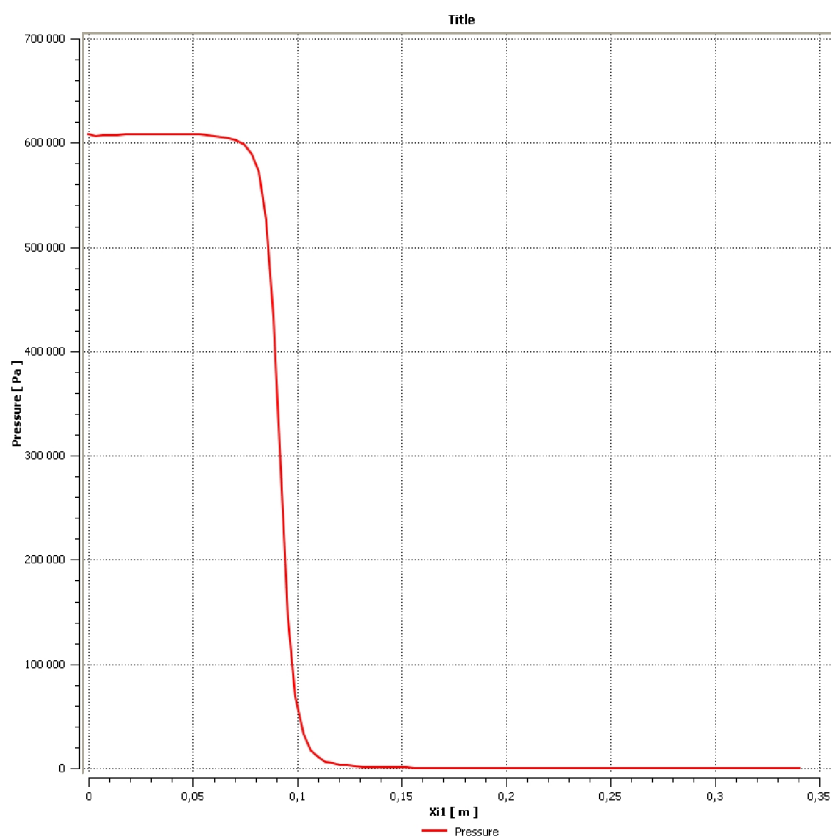


Рисунок 2.56 – Распределение давления продуктов сгорания по оси тракта камеры ЖРД

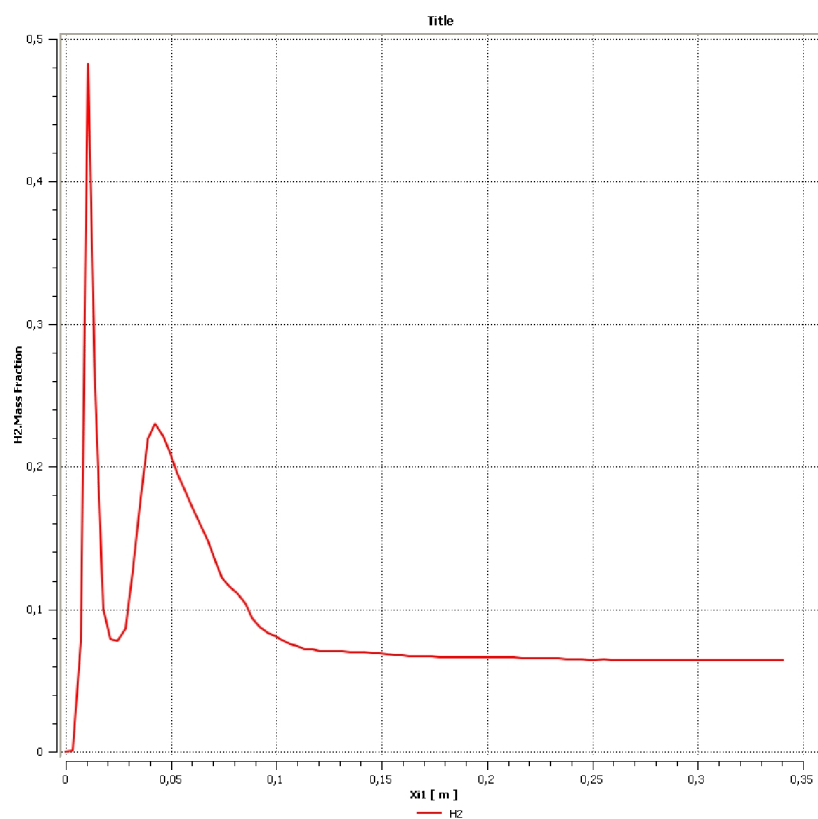


Рисунок 2.57 – Распределение концентрации водорода по оси тракта камеры ЖРД

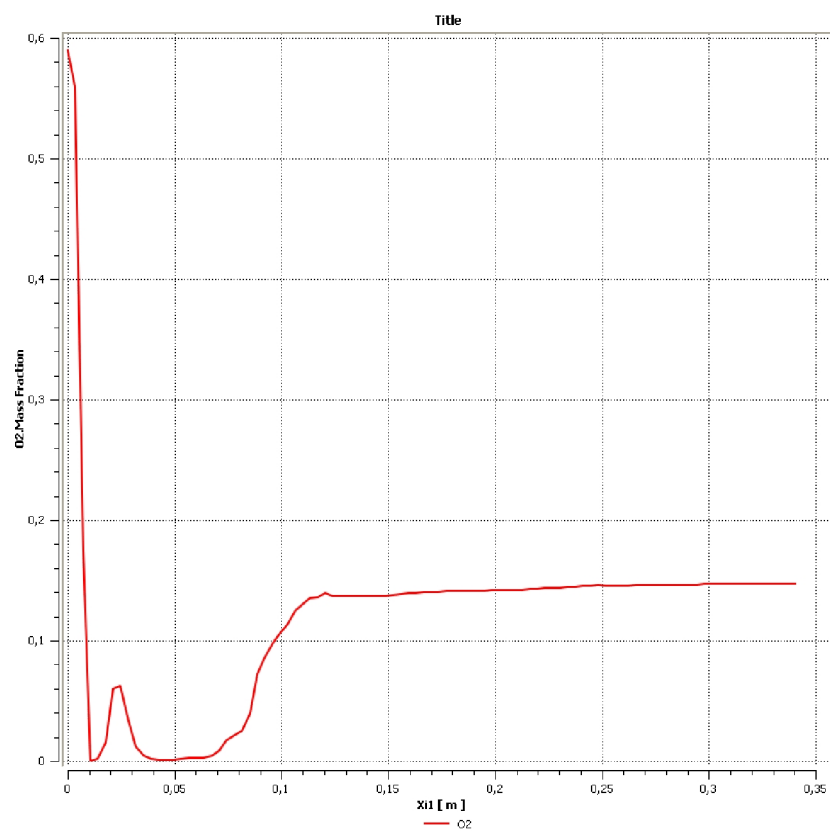


Рисунок 2.58 – Распределение концентрации кислорода по оси тракта камеры ЖРД

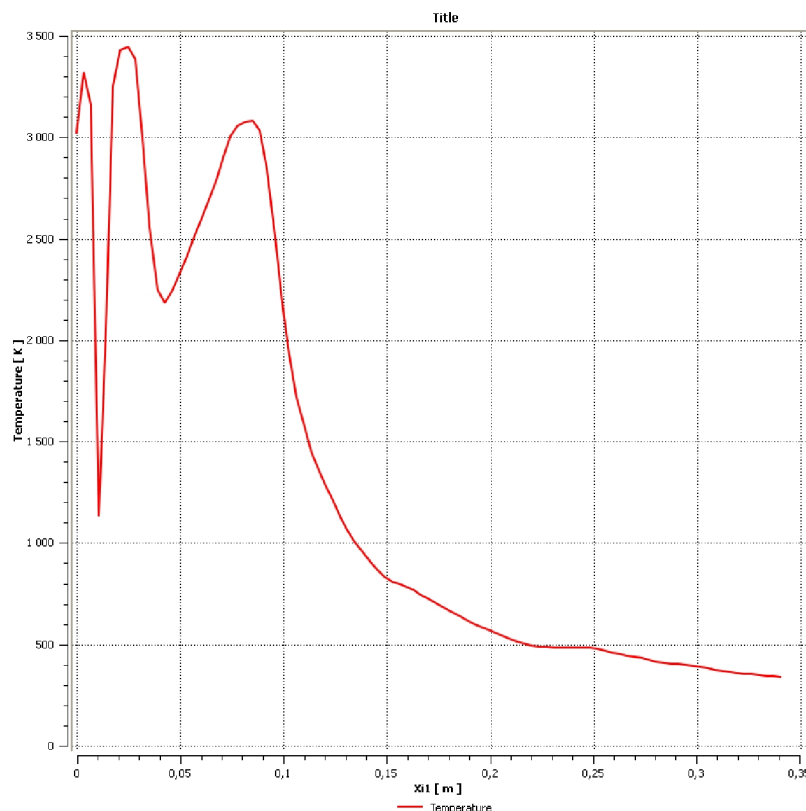


Рисунок 2.59 – Распределение температуры продуктов сгорания по оси тракта камеры ЖРД

2.56 показано изменение скорости и статического давления продуктов сгорания кислородно-водородной смеси. Отметим классическое поведение кривых $V=f(l)$ и $p=f(l)$ с резкими градиентами в области минимального сечения сопла Лавалья ракетного двигателя и плавным изменением параметров в камере сгорания и сверхзвуковой части сопла.

Графики изменения концентрации водорода и кислорода по мере преобразования компонентов топлива в камере сгорания и расширения продуктов сгорания в сопле показаны на рисунках 2.57 и 2.58 соответственно. Видно, что вдоль оси тракта ЖРД на участке практически от минимального сечения сопла до его среза уровень концентрации водорода постоянен и составляет величину $\xi \sim 0,07$, а концентрации кислорода $\xi \sim 0,14$.

На рисунке 2.59 показано изменение статической температуры. В пределах камеры сгорания наблюдаются колебательный характер распределения температуры по осевой координате, который соответствует поясам подачи компонентов топлива, распределенным по длине участка

камеры. Далее по течению продуктов сгорания установлено падение статической температуры в соответствии с закономерностями расширения продуктов сгорания в сопле.

2.8 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И КОНСТРУКЦИИ ЖРД НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ.

В принятой схеме ЖРД на основе коаксиальных, закрученных в одном направлении газовых струй компонентов ракетного топлива – водорода и кислорода, обеспечивающей высокие значения энергии турбулентности как локальной, так и интегральной заложены высокие потенциальные возможности в организации эффективного рабочего процесса.

Расчетным путем для ЖРД получены следующие параметры:

- тяга двигателя $\sim 100\text{Н}$;
- давление в камере сгорания $\sim 0,6\text{ МПа}$;
- удельный импульс тяги $\sim 4200\text{ м/с}$.

Способы совершенствования ЖРД исследуемой схемы смесеобразования основаны на обеспечении более равномерной эпюры полной температуры в поперечных сечениях камеры сгорания. Для этого необходимо интенсифицировать процесс смесеобразования за счет увеличения параметра закрутки (скорости газообразного топлива во входных каналах подачи компонентов).

Кроме этого для повышения полноты сгорания топлива, не меняя схему, возможно добиться традиционным способом – увеличивая приведенную длину камеры сгорания. Однако, последнее повлечет за собой перераспределение температуры торможения в области стенки камеры (дозвуковой части сопла) в сторону её увеличения. Но это приемлемо, если в качестве конструкционного возможно выбрать материал, температура стенки которого превышает температуру продуктов сгорания в области стенки.

Поэтому, повышение энергетических параметров ЖРД это компромиссное решение между величиной этого повышения и возможностью обеспечения допустимого теплового состояния конструкции.

Таким образом, с помощью математической модели вычислительной газовой динамики высокого уровня определен комплекс параметров, которые позволяют характеризовать рабочий процесс ЖРД, оценивать интегральные параметры и характеристики ЖРД в зависимости от определяющих факторов. Анализ расчетной информации дает возможность наметить пути совершенствования рабочего процесса как в направлении повышения эффективности смесеобразования, так и в направлении обеспечения теплового состояния конструкции, путем приведения температуры продуктов сгорания в пристенных слоях в соответствие с допустимой температурой конструкционных материалов. Отдельно отметим, что проблема схемы смесеобразования с применением моделей аналогичных примененной в работе, решается путем принятия обоснованных аргументированных подтвержденных результатами расчета вариантов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ANSYS CFX – Solver Modeling buide. ANSYS CFX Release 11.0 [Текст] / Canous – burg: ANSYS, Inc., 2006 – 566p.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. [Текст] / Л. Г. Лойцянский – М: Дрофа, 2003.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. [Текст] / С. Патанкар – М.: Энергоиздат, 1984.
4. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях пер. с англ. [Текст] / А. Дж. Рейнольдс – М.: Энергия 1979.
5. Турбулентность. Принципы и применение. [Текст] / Под ред. У. Фроста и Т. Моудлена. – М: Мир, 1980.
6. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена [Текст] / Д. Ши пер. с англ. – М: Мир, 1988.
7. Wilcox D.C. Turbulence Modelling for CFD [Текст] / D.C. Wilcox; 2nd edition, DCW Industries, Inc., 1998
8. Варнатц Ю., Масс У., Диббл Р. Горение. Физически и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Масс, Р.М. Диббл: Физматлит, 2003.