

# СОДЕРЖАНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Введение</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1 Моделирование горения в КС с применением программного пакета ANSYS</b> | <b>3</b>  |
| 1.1 Постановка задачи . . . . .   | 3         |
| 1.2 Создание геометрической модели . . . . .                                | 3         |
| 1.3 Расчетная сетка . . . . .   | 6         |
| 1.4 Основные настройки решателя . . . . .                                   | 10        |
| 1.4.1 Модель горения PDF Flamelet . . . . .                                 | 10        |
| 1.4.2 Создание flamelet-библиотеки . . . . .                                | 13        |
| 1.4.3 Создание дополнительных материалов . . . . .                          | 14        |
| 1.4.4 Задание и настройка фаз . . . . .                                     | 16        |
| 1.4.5 Подключение моделей . . . . .   | 16        |
| 1.4.6 Задание граничных условий . . . . .                                   | 19        |
| <b>Заключение</b>   | <b>26</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных узлов воздушно-реактивного двигателя является камера сгорания. Её особенностью является то, что большинство протекающих в ней процессов (распыл топлива, его перемешивание с окислителем, горение образовавшейся смеси) довольно сложны. В связи с этим возникают проблемы при их моделировании в САЕ-системах. Современные программные пакеты не в полной мере описывают все протекающие в КС процессы, не смотря на то, что имеется возможность рассчитывать сотни химических реакций, которые возникают при сгорании топливно-воздушной смеси. Это неизбежно приводит к недостаточной точности результатов расчета.

Для получения требуемых характеристик разрабатываемой камеры сгорания после серии расчетов проводится большой объем экспериментально-доводочных работ. Для уменьшения денежных и временных затрат на эти работы, необходимо иметь максимально точные результаты расчетов протекающих процессов.

В данной работе проводится моделирование горения топливно-воздушной смеси в КС ГТД ТВЗ-117. Используемое топливо - авиационный керосин, а окислитель - атмосферный воздух, сжатый и нагретый компрессором. Все исходные параметры рабочих тел принимаются равными параметрам, которые реализуются на двигателе ТВЗ-117 при взлетном режиме работы. В качестве среды моделирования используется программный комплекс ANSYS. Полученные результаты сравниваются с результатами стендовых испытаний. Также оценивается влияние массовой доли кислорода в рабочем теле на параметры газовой смеси.

# 1 Моделирование горения в КС с применением программного пакета ANSYS

## 1.1 Постановка задачи

Проводится моделирование горения топливно-воздушной смеси в КС ГТД ТВЗ-117. Используемое топливо - авиационный керосин, а окислитель - атмосферный воздух, сжатый и нагретый компрессором. Все исходные параметры рабочих тел принимаются равными параметрам, которые реализуются на двигателе ТВЗ-117 при взлетном режиме работы.

В качестве среды моделирования используется программный комплекс ANSYS. Полученные результаты сравниваются с результатами стендовых испытаний. Также оценивается влияние массовой доли кислорода в рабочем теле на параметры газовой смеси.

Для решения поставленной задачи необходимо сделать следующее:

1) в модуле для создания геометрических моделей построить модель исследуемой КС;

2) в сеточном препроцессоре сгенерировать высококачественную расчетную сетку;

3) в модуле, предназначенном для решения задач гидродинамики и сопряженного теплообмена, задать начальные и граничные условия, а также подключить модели уравнений, необходимые для решения задачи;

4) после завершения расчета и получения результатов, сравнить их с результатами стендовых испытаний;

5) в случае сильного расхождения результатов моделирования и реального эксперимента, задать в качестве граничных условий другие параметры и заново произвести расчет, после чего вновь оценить результаты и повторить действия, указанные в данном пункте, в случае необходимости;

6) произвести серию расчетов с разным содержанием кислорода в рабочем теле и проанализировать полученные результаты.

Этапы решения задачи в ANSYS в общем случае представлены на рис.1.1.

Используемые модули программного комплекса ANSYS:

- создание геометрической модели: Design Modeler;
- генерация расчетной сетки: Meshing;
- решение задач гидродинамики и сопряженного теплообмена: Fluid Flow (CFX).

## 1.2 Создание геометрической модели

Первым этапом решения поставленной задачи является создание геометрической модели. В данной работе для этого используется модуль

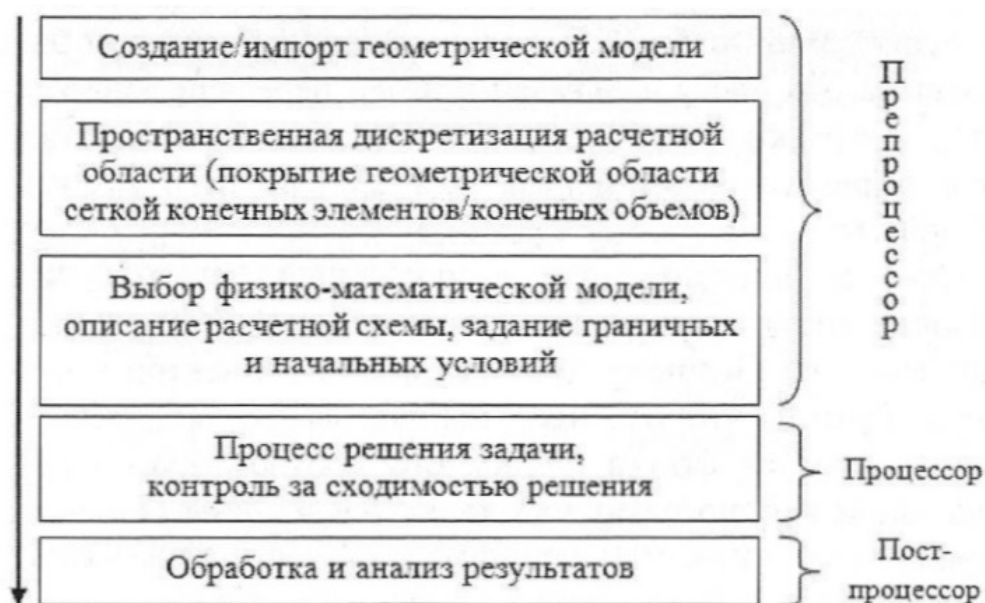


Рисунок 1.1 – Этапы решения задачи

Design Modeler. Он позволяет создавать геометрические модели, путем проведения различных операций над простейшими геометрическими элементами, а также с помощью их параметрического описания. Построение исследуемой КС проводится при помощи последовательного построения элементов модели, начиная с точек и заканчивая твердыми телами. Также стоит отметить, что, с целью уменьшения затрачиваемых мощностей и времени расчета, рассматривается не вся КС целиком, а лишь отдельный тридцатиградусный сектор.

Для построения начальной геометрии был использован чертеж КС, представленный в руководстве по технической эксплуатации двигателя ТВЗ-117 (рис. 1.2). С помощью копировальной бумаги чертеж был перенесен на масштабно-координатную чертежную бумагу, где были измерены и отмечены все необходимые размеры.

По координатам были построены основные опорные точки для будущей модели (опция Point). Далее по точкам были созданы образующие кривые (опция 3D Curve), по которым, в свою очередь, были построены образующие поверхности (рис. 1.3).

Для создания объемной геометрии сектора камеры использовалась операция вращения (Revolve), применяемая к образующим поверхностям, при этом ось вращения образующей поверхности внешнего обтекателя была расположена параллельно продольной оси камеры и проходила через центр фронтального устройства. Отверстия в жаровой трубе создавались с помощью опции выдавливания (Extrude). Кромки отверстий и секций жаровой трубы были скруглены с помощью опции Fixed Radius Blend. Для создания геометрии проточной зоны использовалась логическая операция вычита-

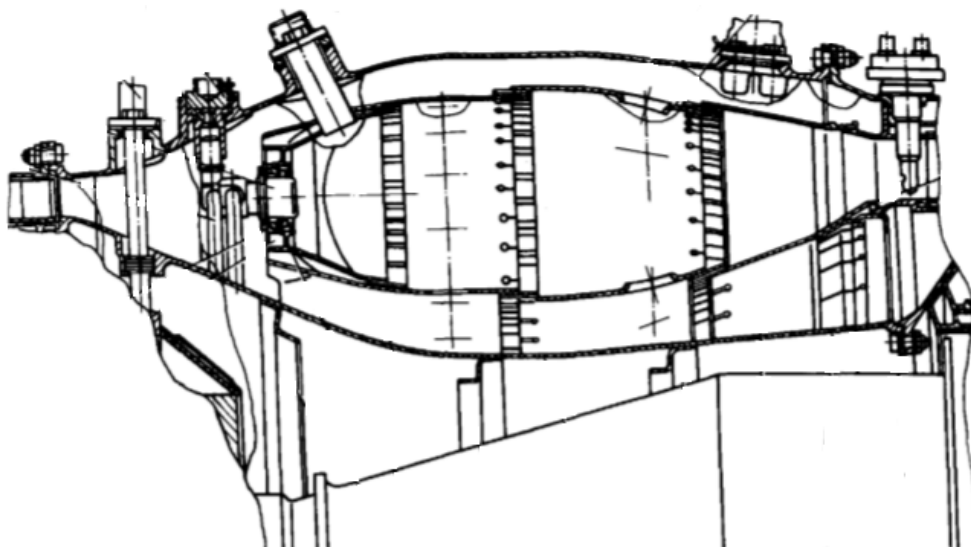


Рисунок 1.2 – Сечение исследуемой КС

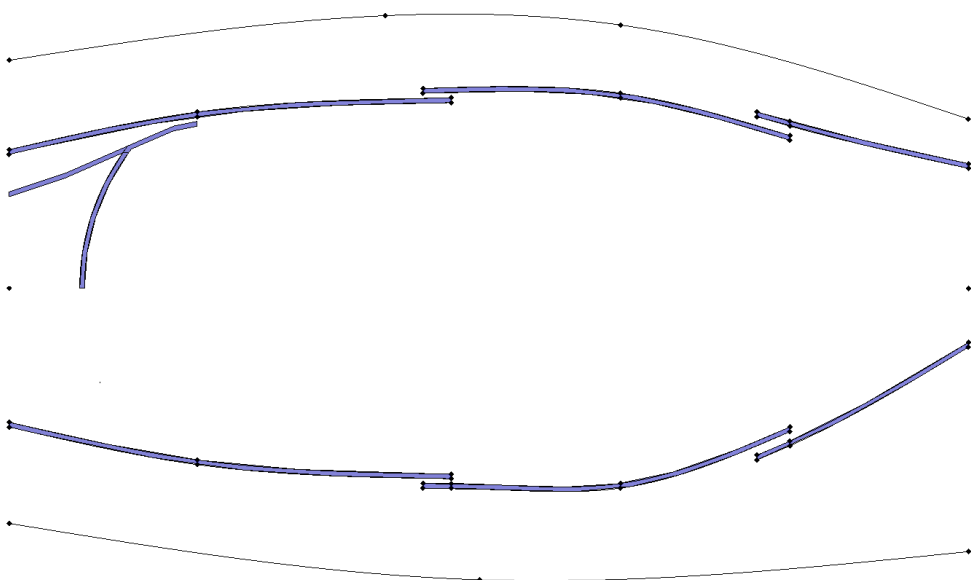


Рисунок 1.3 – Образующие поверхности модели КС

ния (Boolean-Subtract). Используя опцию Analysis Tools-Fault Detection, модель была обследована на наличие поврежденной геометрии. На конечном этапе были отмечены поверхности (Named Selection), на которых в дальнейшем будут задаваться граничные условия. Построенная в Design Modeler модель КС газотурбинного двигателя ТВ3-117 изображена на рис.1.4.

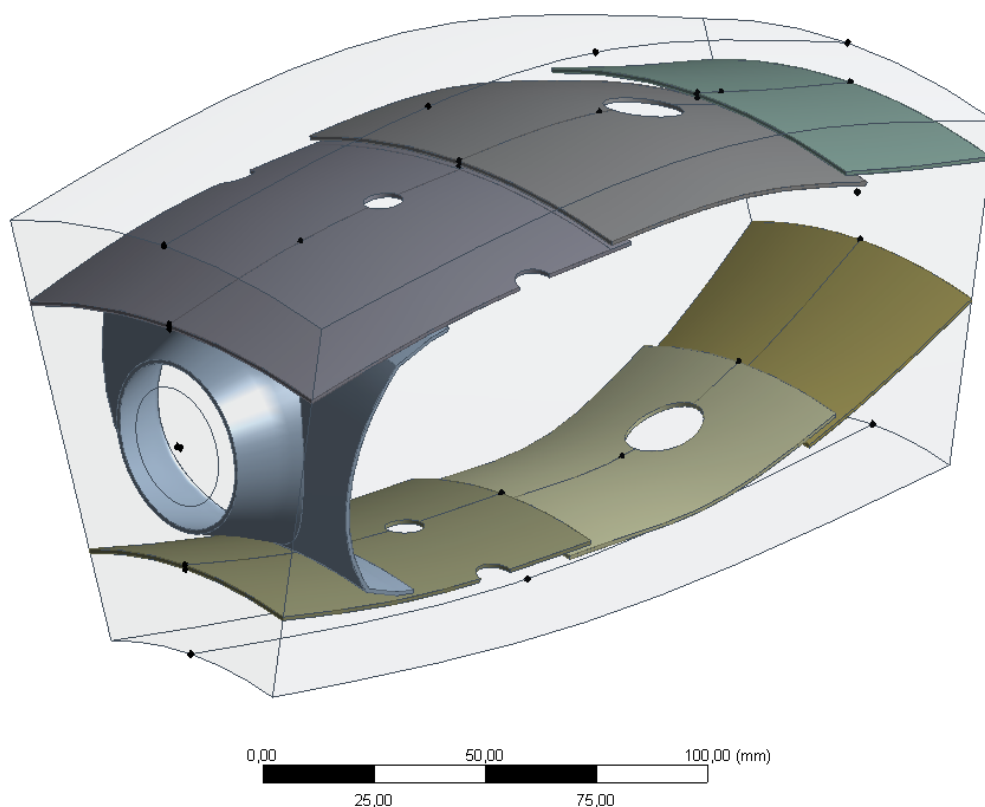


Рисунок 1.4 – Модель КС ГТД ТВЗ-117

### 1.3 Расчетная сетка

При замене дискретными аналогами дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают поведение сплошной среды, появляются новые параметры - временной и пространственные шаги расчетной сетки. Генерация расчетной сетки является крайне важным этапом при решении задач сплошной среды методами конечных объемов и конечных элементов. Для достижения достоверных и точных результатов сетка должна быть качественной и учитывать особенности решаемой задачи. В противном случае есть вероятность того, что будет отсутствовать сходимость и численное решение будет разрушаться, а результаты расчета не будут соответствовать действительности.

В общем случае построение качественной расчетной сетки состоит из трех этапов:

- 1) изменение глобальных и локальных настроек сетки;
- 2) генерация расчетной сетки;
- 3) проверка качества сетки.

В случае неудовлетворительных результатов процесс повторяется заново.

В ANSYS-Meshing для контроля качества ячеек используя раздел Statistics. Выбирая различные критерии качества, отображаются графические данные, показывающие количество ячеек и элементов, которые соответствуют выбранному параметру. Также в разделе содержится информация об общем количестве ячеек и элементов.

Основными критериями качества расчетных сеток являются:

- Element Quality: величина критерия варьируется от 0 (минимальное качество) до 1 (максимальное качество). Основой данного параметра является отношение объема элемента к квадратному корню от суммы квадратов длин ребер элемента в кубе:

$$Quality^{3D} = C(V/\sqrt{\sum (EdgeLength^2)^3}),$$

где V - объем элемента, C - коэффициент, зависящий от формы элементов (рис. 1.5);

| Тип Элемента | Параметр С |
|--------------|------------|
| Тетраэдр     | 124,7      |
| Гексаэдр     | 41,6       |
| Призма       | 96         |

Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента С от формы элемента

- Aspect Ratio: величина критерия варьируется от 0 (минимальное качество) до 1 (максимальное качество), но для некоторых задач значение параметра может принимать и более высокие значения. Основой данного параметра является отношение наибольшей и наименьшей сторон ячейки.

- Maximum Corner Angle: критерий представляет собой наибольший по значению угол из всех углов между каждыми двумя ребрами ячейки, прилегающими к общей вершине. Максимальное качество по данному критерию зависит от формы ячейки (рис. 1.6);

| Форма элемента      | Угол |
|---------------------|------|
| Треугольная форма   | 60°  |
| Прямоугольная форма | 90°  |

Рисунок 1.6 – Зависимость наилучшего значения критерия от формы элемента

- Skewness: величина критерия варьируется от 0 (максимальное качество) до 1 (минимальное качество). Критерий определяет близость формы ячейки к идеальной (форма прямоугольника или равностороннего треугольника);

- Orthogonal Quality: величина критерия варьируется от 0 (минимальное качество) до 1 (максимальное качество). Критерий определяется как минимальное из следующих величин:

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| \cdot |\vec{f}_i|}; \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| \cdot |\vec{c}_i|},$$

где  $\vec{c}_i$  - векторы, направленные по нормали к граням ячейки, проведенные из геометрического центра текущего элемента к геометрическим центрам соседних элементов;  $\vec{f}_i$  - векторы, проведенные из геометрического центра текущего элемента к геометрическому центру каждой грани текущей ячейки;  $\vec{A}_i$  - вектор, нормальный к грани элемента (рис. 1.7).

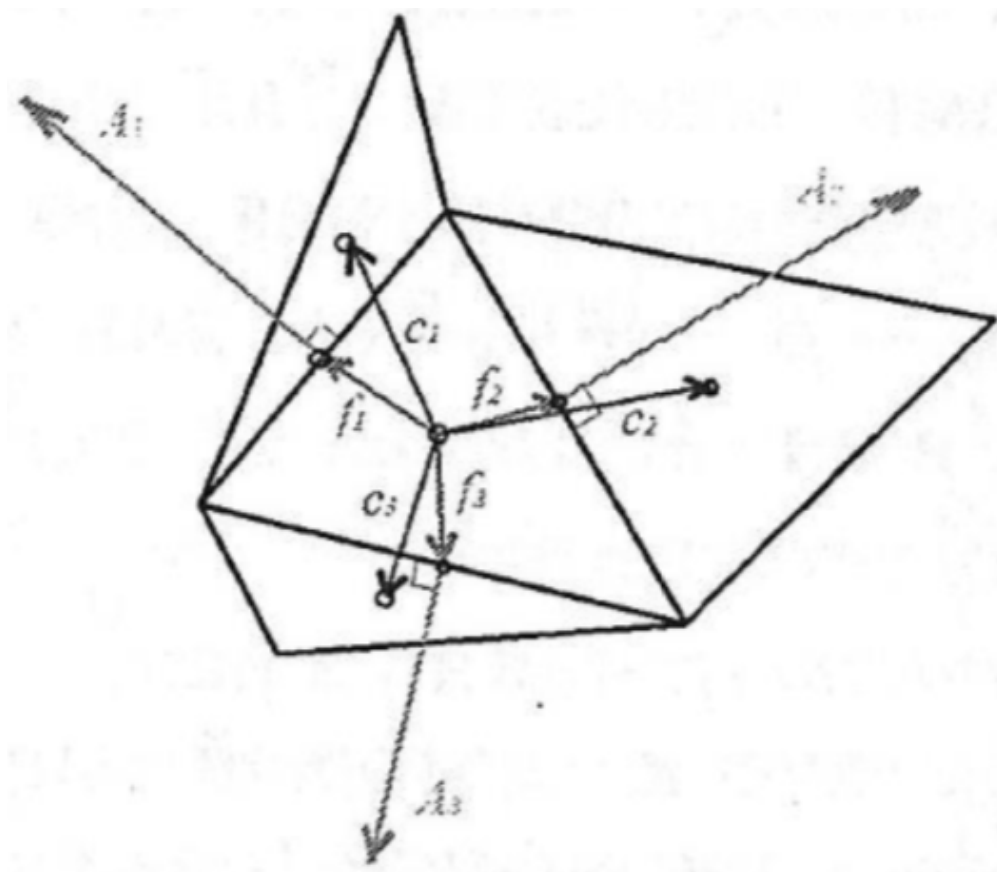


Рисунок 1.7 – Графическая интерпретация критерия Orthogonal Quality

В данной работе путем изменения глобальных и локальных настроек сеточного генератора необходимо было достичь такого количества элементов, при котором результаты расчета были бы достаточно точны, а время



расчета не было бы слишком велико. По причинам неактуальности и сильного увеличения количества элементов сетки было решено не генерировать пристеночные призматические слои.

Сетка, сгенерированная при автоматической настройке параметров, была слишком разрежена и обладала неудовлетворительным качеством. Для решения этой проблемы были выставлены следующие глобальные и локальные настройки:

- параметр "Relevance" отвечающий за разрешающую способность сетки, был увеличен с 0 до 100, что способствует генерации сетки с наибольшей плотностью ячеек;

- для контроля минимального и максимального характерного размера сеточных элементов и для регулировки количества слоев ячеек в зазорах между геометрическими элементами в опции "Use Advanced Size Function" был выставлен режим "Curvature and Proximity";

- с помощью функции "Sizing" локально был уменьшен характерный размер элементов.

Конечный вариант расчетной сетки (рис. 1.8) состоит из 8 миллионов ячеек и обладает удовлетворительным качеством элементов: max skewness - 0,83; min orthogonal quality - 0,15.

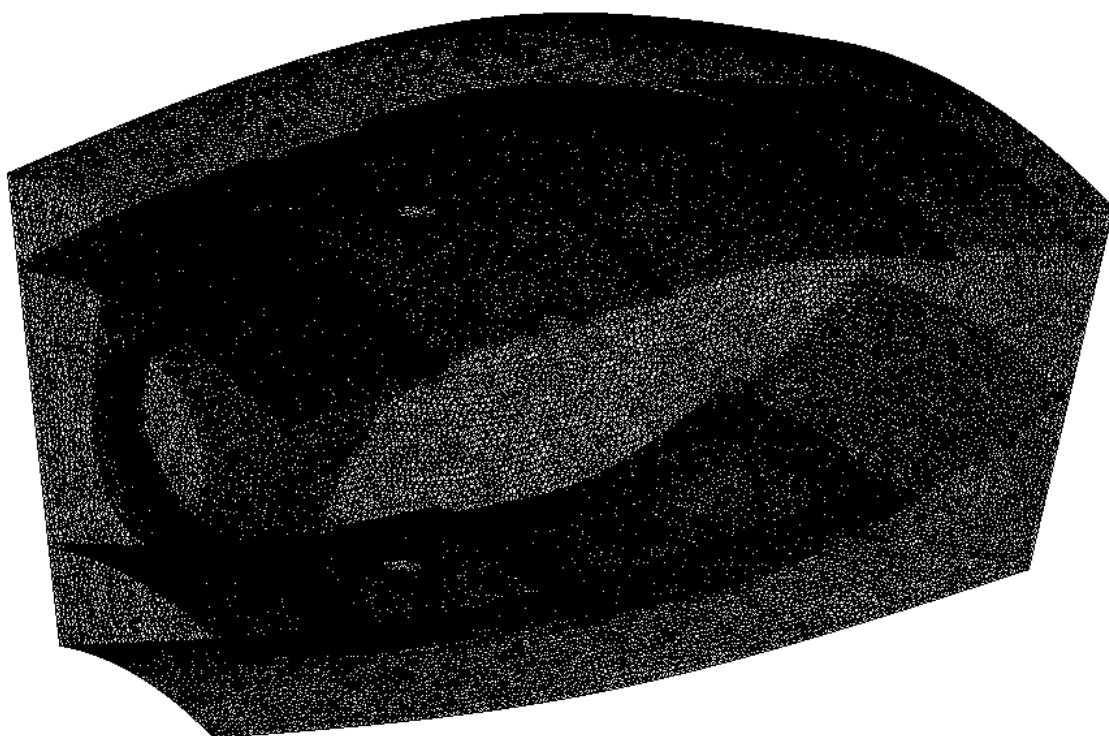


Рисунок 1.8 – Расчетная сетка

## 1.4 Основные настройки решателя

В программном комплексе ANSYS имеется набор модулей, которые специализируются на решении задач гидродинамики и газодинамики (CFX, Fluent, Polyflow, Airpak, Icpak). В данной работе использовался решатель CFX.

ANSYS CFX - это программный комплекс, предназначенный для моделирования течений газа и жидкостей в каналах и областях различной геометрической сложности. При этом комплекс позволяет учитывать протекание различных химических реакций и теплопередачу. В модуле имеется база данных материалов, а также есть возможность создавать новые и наделять их своими свойствами. Для сокращения времени расчета в ANSYS CFX можно "распараллелить" процесс расчета по ядрам процессора электронно-вычислительной машины.

С помощью ANSYS CFX можно моделировать:

- течения в различных постановках (плоские, симметричные, объемные);
- установившиеся и не установившиеся течения;
- течения при дозвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях (с учетом сжимаемости рабочего тела);
- течения различной степени турбулентности (невязкие, ламинарные, турбулентные);
- ньютоновские и неньютоновские жидкости;
- течения с реальным или идеальным газом;
- течения со всеми видами теплопередачи (теплопроводность, свободная и вынужденная конвекция, излучение);
- течения с различными химическими реакциями;
- течения с разными фазами (жидкость и газ, жидкость и твердые частицы, газ и твердые частицы);
- течения дискретных частиц, с учетом их взаимодействия на основной поток рабочего тела;
- течения с кавитацией;
- течения с фазовыми переходами.

### 1.4.1 Модель горения PDF Flamelet

В данной работе для моделирования горения топливо-воздушной смеси используется модель PDF Flamelet. Среди всех моделей, которые CFX предлагает для использования, эта является наиболее подходящей для расчета горения газообразного керосина без предварительного смешения компонент топлива и окислителя.

Особенностями модели являются:

- более подробное разрешение структуры пламени (по сравнению с другими моделями горения);
- количество промежуточных химических реакций, которые реализуются в процессе горения, ограничивается лишь объемом оперативной памяти электронно-вычислительной машины;
- горение реализуется в тонких слоях, которые называются микроламинарными пламенами, а турбулентное пламя представляет из себя систему этих пламен;
- модель добавляет в основную систему два уравнения: скалярный перенос величины переменной смешения и величины ее дисперсии;
- все компоненты, которые будут образовываться в ходе горения топлива, определяются заранее в flamelet-библиотеке;

### **Допущения**

При использовании модели PDF Flamelet вводится ряд допущений и условий, в рамках которых она может быть использована. К ним относятся:

- потоки горючего и окислителя подаются раздельно в камеру сгорания;
- равенство коэффициентов диффузии (это условие является приемлемым для турбулентных потоков);
- число Льюиса равно единице. В рамках данного допущения интенсивности переноса массы примеси диффузией и переноса теплоты теплопроводностью одного порядка;
- низкие числа Маха;
- свойства среды (плотность, температура) определяются как средние для всей смеси;

### **Концепция модели**

Основой модели PDF Flamelet является скалярная величина - переменная смешения  $Z$ , благодаря которой заметно упрощается расчет задачи горения предварительно не перемешанных компонентов. переменная смешения  $Z$  используется для характеристики диффузионных пламен и представляет собой отношение массового расхода горючего компонента к суммарному массовому расходу компонентов горючего и окислителя. На входной границе горючего компонента  $Z=1$ , на входной границе окислителя  $Z=0$ , а в других областях переменная смешения показывает, какую долю в точке пространства занимает поток горючего компонента.

$$Z = \frac{G_t}{G_t + G_v}$$

Польза данной величины состоит в том, что её использование позволяет получить одно уравнение сохранения компонентов без источникового члена, а массовые доли компонентов и продуктов сгорания являются ее функциями.

В рамках принятых допущений уравнения переноса компонентов можно свести к единственному уравнению относительно сохраняющейся скалярной величины - переменной смешения  $Z$ . В этом уравнении отсутствуют нелинейные источниковые члены, т.к. переменная смешения по своему определению привязана не к компонентам ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и т.д.), а к атомам веществ ( $\text{C}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$  и т.д.). И поскольку при химических реакциях меняются массы веществ, а атомы остаются неизменными, то и переменная смешения является скалярной величиной без источника.

Уравнение переноса, осредненное по Фавру, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{Z}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{Z}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{Z} \right)$$

где  $\mu_t$  - турбулентная вязкость,  $\sigma_t$  - турбулентное число Прандтля.

В рамках данной модели все массовые доли компонент, плотность и температура являются функциями только переменной смешения, т.е.

$$\theta_i = \theta_i(Z)$$

В случае, когда рассматривается не адиабатный процесс, искомые параметры будут зависеть еще и от энтальпии  $h$ :

$$\theta_i = \theta_i(Z, h)$$

Рассматривая турбулентные течения, необходимо учитывать, что любая скалярная величина претерпевает некоторые флуктуации, которые могут приводить к значительным колебаниям значений искомых параметров, например, приводить к значениям температуры выше энергии активации. Поэтому при моделировании горения необходимо учитывать турбулентно-химическое взаимодействие. В данной модели это взаимодействие учитывается статистическим образом при помощи функции плотности вероятности. В пакете имеется две ее разновидности:  $\beta$  - функция и двойная  $\delta$  - функция Дирака. Они зависят от значений своих математического ожидания и дисперсии. Наиболее часто при описании флуктуаций турбулентности встречается  $\beta$  - функция. Уравнение переноса дисперсии переменной смешения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{Z'^2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \overline{Z'^2}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{Z'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{Z})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \overline{Z'^2}$$

где  $C_g=2.86$  ,  $C_d=2.0$ .

В качестве искомого решения используется осредненное значение параметра, которое получается следующим образом: из термодинамического расчета (без кинетики) определяются зависимости параметров равновесия (массовые доли и концентрации компонент, температура и др.) от параметра смешения, затем используя известную (заданную) функцию плотности вероятности  $P(Z)=P(\bar{Z}, \bar{Z}^2)$ , интегрируем и получаем осредненную величину параметра:

$$\bar{\theta}_i = \int P(Z)\theta_i(Z)dZ$$

К недостаткам данной равновесной модели горения предварительно не перемешанных компонент следует отнести отсутствие учета кинетики процесса, т.е. она не позволяет моделировать неравновесные процессы.

#### 1.4.2 Создание flamelet-библиотеки

Изначально в ANSYS CFX присутствует две стандартные flamelet-библиотеки, описывающие реакции горения водорода ( $H_2$ ) и метана ( $CH_4$ ). Для создания библиотеки с данными о горении газообразного керосина необходимо воспользоваться инструментом CFX-RIF (Representative Interactive Flamelets). Данный инструмент является модулем ANSYS CFX и предназначается для автоматического создания flamelet-библиотек. CFX-RIF позволяет изменять параметры генерируемой библиотеки. Например, можно изменить массовые доли компонентов топлива или окислителя, что будет применено в данной работе при исследовании влияния массовой доли кислорода в рабочем теле на параметры газовой смеси. Также здесь указываются начальные значения температуры компонентов окислителя и горючего и давление.

В данной работе была инициирована генерация flamelet-библиотеки на основе горения газообразного керосина в воздухе (Fuel Module - Jet A (surrogate)). В CFX-RIF имеется возможность выбрать химический механизм для реакций в газовой фазе, по которой учитывается или не учитывается образование оксидов азота  $NO_x$ . С целью уменьшения времени расчета был выбран механизм не учитывающий образование  $NO_x$  (Kinetic Scheme - without  $NO_x$ ). Для основного расчета массовые доли компонентов окислителя и горючего были оставлены по умолчанию:

- воздух: кислород  $O_2$ -0,233, азот  $N_2$ -0,767;
- керосин: триметилбензол  $TMB C_9H_{12}$ -0,4, н-декан  $NC_{10}H_{22}$ -0,6.

На взлетном режиме работы, воздух, пройдя через компрессор, нагревается примерно до 600 К, а топливо на выходе из форсунок имеет температуру 300 К. В настройках flamelet-библиотеки данные величины были присвоены соответственно окислителю и топливу, а также было выставлено

давление равное 1 атмосфере (рис. 1.9).

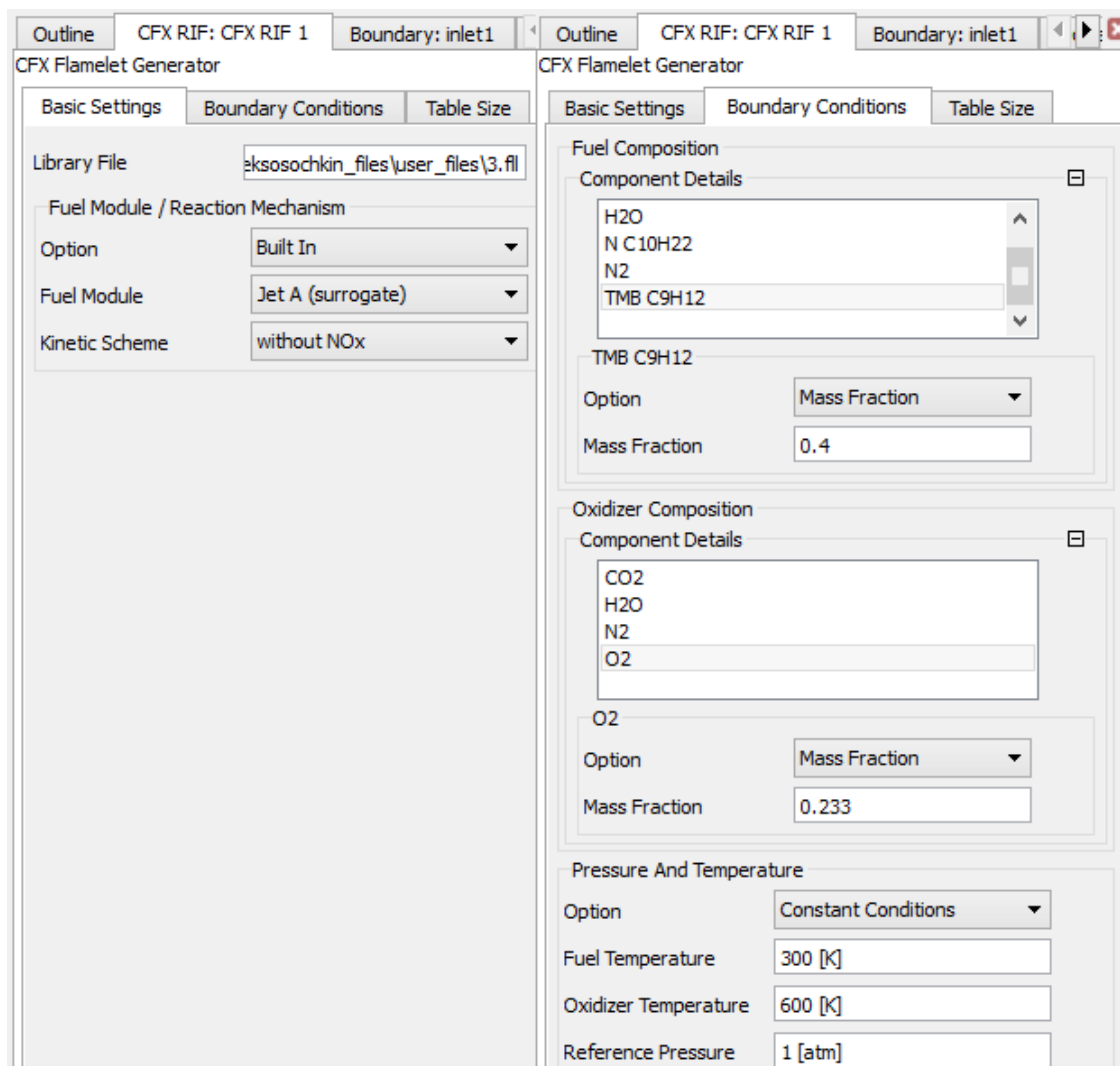


Рисунок 1.9 – Создание и настройка flamelet-библиотеки

### 1.4.3 Создание дополнительных материалов

Для начала в общий список используемых для расчета материалов (вкладка Materials) нужно добавить керосин в жидком виде (JetA Liquid), который появится в общей библиотеке после генерации flamelet-библиотеки.

Для учета кипения и испарения капле керосина в ANSYS CFX необходимо создать отдельный материал - гомогенную бинарную смесь (Homogeneous Binary Mixture), которая будет состоять из жидкого и газообразного компонентов (рис. 1.10). В качестве жидкого компонента выступает жидкий керосин, а в качестве газообразного - его паровая фаза (JetA Liquid и  $TMB C_9 H_{12}$ ). Не смотря на то, что данный материал не используется напрямую при задании начальных и граничных условий, он необходим

для определения взаимосвязи между давлением и температурой насыщения, которая характеризуется для каждого вида испаряющегося вещества соответствующими коэффициентами и определяется уравнением Антуана:

$$\ln P = A - \frac{B}{T + C}.$$

Константы уравнения Антуана для керосина:  $A=30,2212$ ;  $B=8418,25$ ;  $C=0$ .

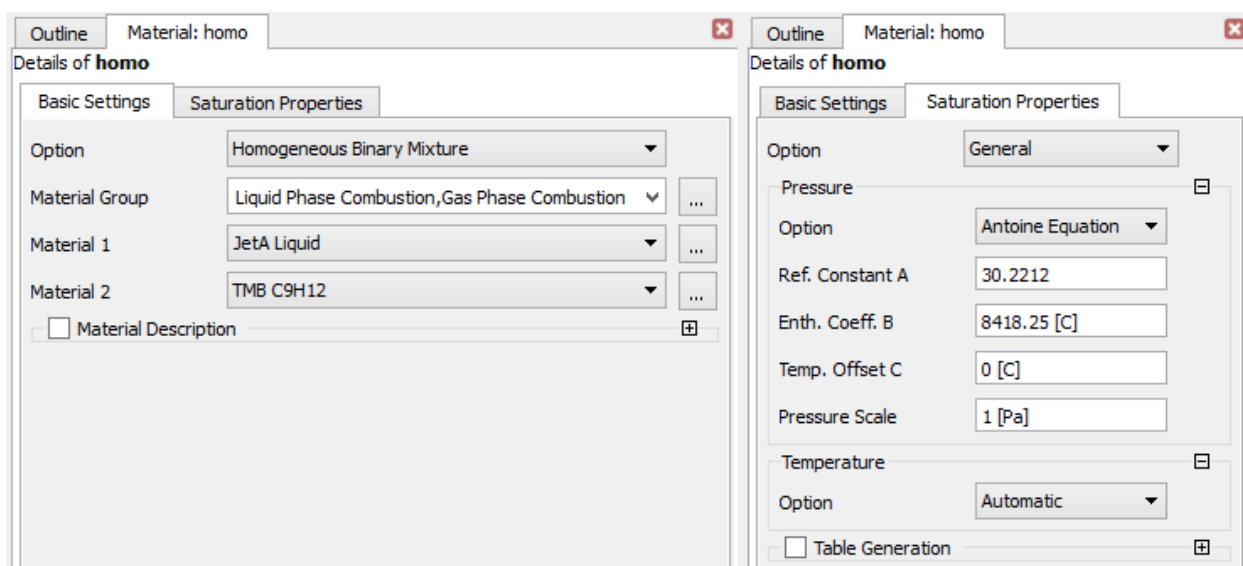


Рисунок 1.10 – Создание и настройка гомогенной бинарной смеси

Также необходимо создать среду (Reacting Mixture), в которой будут протекать реакции, сопутствующие горению топлива и описанные в созданной flamelet-библиотеке (рис. 1.11).

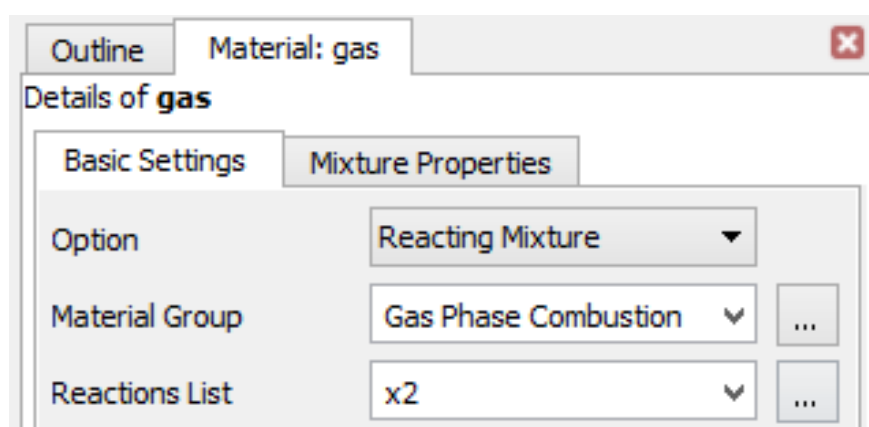


Рисунок 1.11 – Создание Reacting Mixture

#### 1.4.4 Задание и настройка фаз

На следующем этапе необходимо задать и настроить фазы, которые будут присутствовать в ходе работы двигателя (рис. 1.12). Первая из них - газовая фаза, которая была инициирована ранее (Reacting Mixture) и является сплошной (Continuous Fluid). Вторая - дискретная фаза, которая также была инициирована ранее (капли жидкого керосина - JetA Liquid) и определяется моделью Лагранжа (Particle Transport Fluid), которая позволяет моделировать движение частиц распыленного горючего, учитывая их взаимодействие с основным потоком.

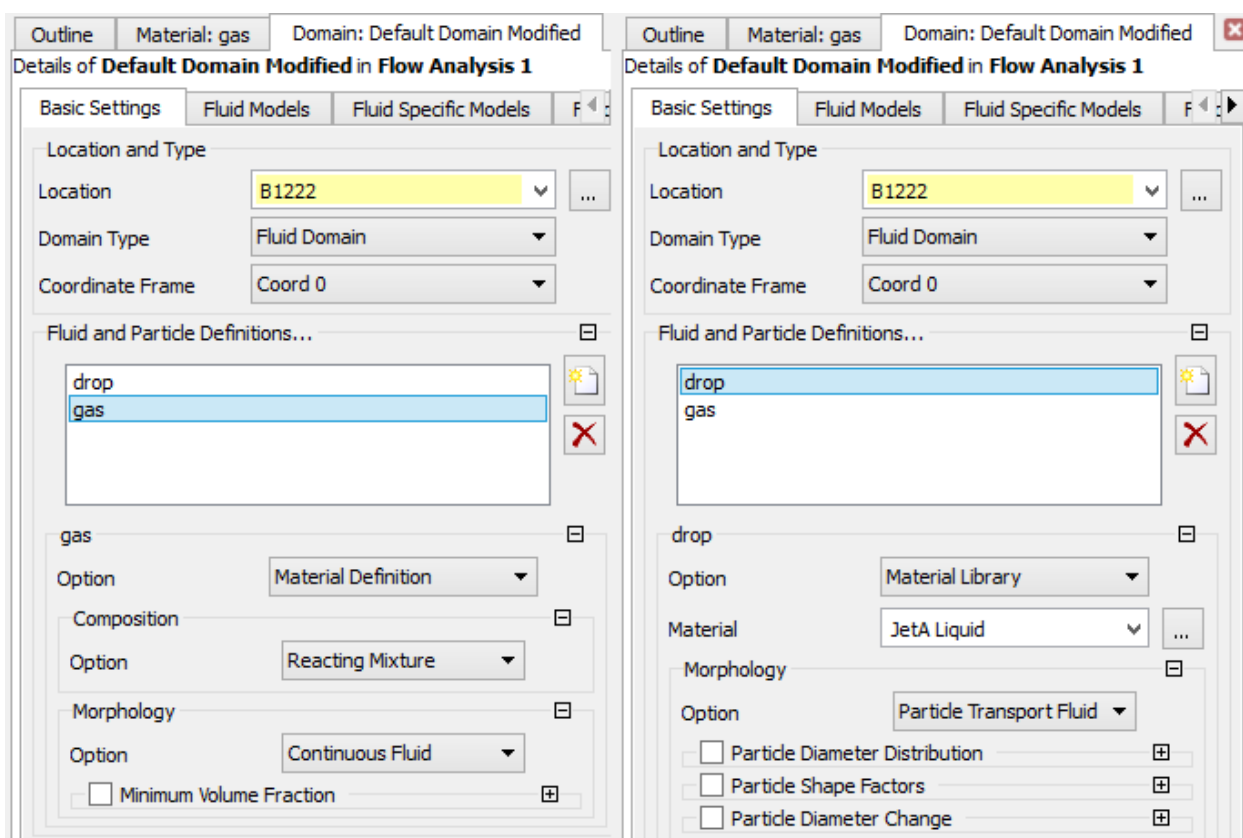


Рисунок 1.12 – Задание и настройка газовой и дискретной фазы

#### 1.4.5 Подключение моделей

Для решения поставленной задачи необходимо дополнить основную систему уравнений, которая используется при расчете. Это делается путем подключения различных моделей.

##### Модель теплопередачи

Модель теплопередачи (Heat Transfer) используется для определения температуры во всем потоке.



Величина переноса теплоты конвекцией  $Q_c$  определяется, как:

$$Q_c = \pi d \lambda Nu (T_G - T_p),$$

где  $\lambda$  это теплопроводность жидкости,  $T_G$  и  $T_p$  это температуры потока и частиц вещества, а  $Nu$  это число Нуссельта.

Для случаев, в которых реализуются межфазные реакции с участием частиц, в величину конвективного теплообмена вносится поправка, которая основывается на величине массопереноса частиц:

$$Q'_c = Q_c \zeta \frac{e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}},$$

где  $\zeta$  определяется, как:

$$\zeta = C_p \frac{\left| \frac{dm}{dt} \right|}{\pi d \lambda Nu},$$

где  $\left| \frac{dm}{dt} \right|$  - величина массопереноса частиц.

Массовый теплообмен  $Q_M$  определяется следующим соотношением:

$$Q_M = \sum \frac{dm_c}{dt} V,$$

в котором суммируются все компоненты частиц вещества, которые участвуют в теплообмене. Теплота парообразования  $V$  зависит от температуры и определяется свойствами жидких частиц и их паровой фазы, которые были определены при задании материалов (вкладка Materials).

Теплообмен излучением  $Q_R$  для частиц вещества диаметром  $d_p$ , с температурой  $T_p$  и степенью черноты  $\varepsilon_p$  определяется как:

$$Q_R = \varepsilon_p \pi d_p^2 (\pi I - \sigma n^2 T_p^4),$$

где  $I$  - интенсивность излучения с поверхности частицы вещества,  $n$  - степень преломления жидкости, а  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана.

В итоге величина изменения температуры для частицы вещества определяется как:

$$\sum (m_c C_p) \frac{dT}{dt} = Q_c + Q_M + Q_R,$$

где сумма берется по всем компонентам частиц вещества.

## Модель турбулентности

Величины параметров турбулентного течения варьируются около средних значений. Из этого следует, что величины компонент скорости  $u_j$  определяются, как сумма средних и пульсационных составляющих:

$$u_j = \bar{u}_j + u'_j.$$

Интенсивность пульсаций скорости характеризуется кинетической энергией турбулентности  $k$ :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_j u'_j}.$$

Скорость диссипации  $\varepsilon$  представляет собой уменьшение кинетической энергии турбулентности  $k$  в единицу времени, то есть скорость распада вихрей. Она определяется следующим соотношением:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{S'_{ij} S'_{ij}},$$

где величина  $S'_{ij}$  определяется, как :

$$S'_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}\right)}{2}.$$

Используя уравнение Навье-Стокса для несжимаемой среды, получаем уравнения переноса кинетической энергии турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = -\frac{\partial T_j}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\nu \overline{S'_{ij} S'_{ij}},$$

где величина  $T_j$  определяется, как:

$$T_j = \frac{\overline{u'_i u'_i u'_j}}{2} + \frac{\overline{u'_j p}}{\rho} - 2\nu \overline{u'_i S'_{ij}}.$$

Всем членам, стоящим в правой части, уравнения переноса кинетической энергии турбулентности можно придать физический смысл: член  $-\frac{\partial T_j}{\partial x_j}$  отвечает за турбулентную диффузию,  $\overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  за генерацию вихрей, а  $2\nu \overline{S'_{ij} S'_{ij}}$  за их диссипацию.

В данной работе была проведена серия расчетов с использованием следующих моделей турбулентности:

- модель K-Epsilon;
- модель Shear Stress Transport;
- модель BSL Reynolds Stress;
- модель SSG Reynolds Stress.

Было выяснено, что выбор модели турбулентности в данной постановке существенно не влияет на результаты решения задачи. Но наиболее сопоставимыми с реальными испытаниями оказались результаты, полученные при использовании модели K-Epsilon.

Основной целью модели турбулентности, основанной на турбулентной вязкости (eddy viscosity model), является определение рейнольдсовых напряжений. Чтобы это сделать, необходимо, используя другие параметры потока, вычислить турбулентную вязкость. Все эти модели отличаются друг от друга уравнениями переноса, с помощью которых определяются характеристики турбулентности.

В модели К-Epsilon используется 2 уравнения переноса: для кинетической энергии турбулентности  $k$  и для скорости её диссипации  $\varepsilon$ , а также уравнение Колмогорова-Прандтля для вычисления турбулентной вязкости.

Уравнение переноса кинетической энергии турбулентности, полученное из уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \varepsilon,$$

где член  $P_k$  - скорость генерации турбулентной энергии:

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j},$$

а  $\sigma_k$  - эмпирическая константа, которую приравнивают к единице.

Для замыкания уравнения переноса скорости диссипации кинетической энергии турбулентности необходимы определенные допущения.  $\varepsilon$  необходимо рассматривать, как поток энергии от крупных вихрей к мелким. Этот поток возникает в ходе дробления вихрей. Учитывая эти допущения, уравнение для переноса скорости диссипации кинетической энергии турбулентности выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \left( -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где первый член в правой части уравнения - турбулентная вязкость, второй - генерация, а третий - диссипация.

#### 1.4.6 Задание граничных условий

После подключения всех необходимых моделей нужно задать граничные условия. Известны следующие исходные данные соответствующие взлетному режиму работы двигателя ТВЗ-117 без ПЗУ:

- мощность на выводном валу - 2200 л.с.;
- температура газов перед турбиной не выше 920 °C;
- расход топлива - 0,15  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;
- температура топлива на входе в КС - 27 °C;
- диаметр капель керосина - 30 мкм;

- давление воздуха на входе в КС - 10 атм;
- температура воздуха на входе в КС - 327 °C;
- расход воздуха -  $9 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

В данной постановке основными граничными условиями являются два условия на вход (для горючего и воздуха) и одно на выход из расчетной области (для смеси). Крайне важно определить какие именно условия необходимо задавать, так как это влияет на сходимость решения, скорость расчета и точность результатов. В работе проводилась серия расчетов с разными комбинациями граничных условий:

- 1) расход на входе для воздуха и горючего, давление на выходе ( $G_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - P_{out-mix}$ );
- 2) расход на входе для воздуха и горючего, расход на выходе ( $G_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - G_{out-mix}$ );
- 3) полное давление на входе для воздуха, расход для горючего, расход на выходе ( $P_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - G_{out-mix}$ ).

Выбор первой комбинации ( $G_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - P_{out-mix}$ ) приводил к нефизичным результатам, которые сильно отличались от результатов реальных испытаний.

Выбор второй комбинации ( $G_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - G_{out-mix}$ ) приводил к неустойчивому решению задачи, накоплению вычислительных ошибок и, как следствие, к остановке расчета.

Выбор третьей комбинации ( $P_{inlet-ox} - G_{inlet-fuel} - G_{out-mix}$ ) приводил к физичным результатам, которые наиболее полно соответствовали результатам реальных испытаний.

Прежде чем задавать выбранные граничные условия, необходимо вспомнить, что все начальные данные соответствуют работе двигателя с полноразмерной камерой сгорания. В данной же постановке рассматривается только тридцатиградусный сектор. Соответственно, для корректного задания граничных условий, необходимо взять лишь двенадцатую часть от расходов топлива и воздуха. Таким образом, получаем:

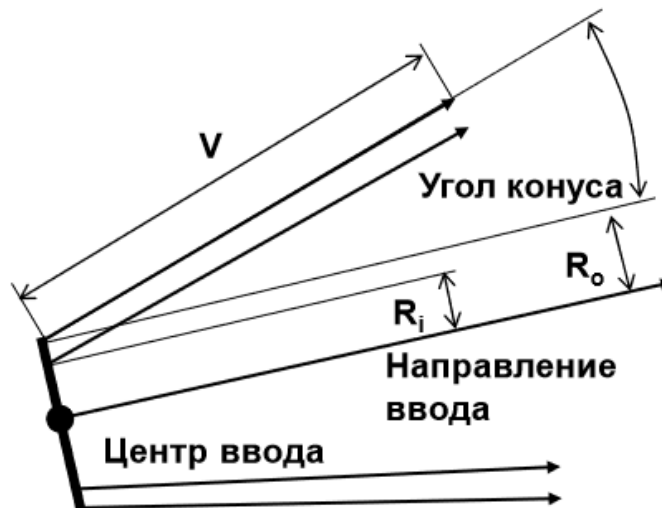
$$G_{inlet-ox} = 9[\frac{\text{кг}}{\text{с}}]; G_{inlet-ox-12} = \frac{G_{inlet-ox}}{12} = 0,75[\frac{\text{кг}}{\text{с}}];$$

$$G_{inlet-fuel} = 0,15[\frac{\text{кг}}{\text{с}}]; G_{inlet-fuel-12} = \frac{G_{inlet-fuel}}{12} = 0,125[\frac{\text{кг}}{\text{с}}];$$

$$G_{out-mix} = 9,15[\frac{\text{кг}}{\text{с}}]; G_{out-mix-12} = \frac{G_{out-mix}}{12} = 0,7625[\frac{\text{кг}}{\text{с}}].$$

## Подача топлива

В камере сгорания газотурбинного двигателя ТВЗ-117 установлено 12 форсунок, распыляющих топливо конусообразной пелиной. В ANSYS CFX есть возможность задать ввод частиц топлива в области, ограниченной заданным конусом (рис. 1.13).



**$R_i$  = Внутренний радиус плоскости ввода**

**$R_o$  = Наружный радиус плоскости ввода**

**$V$  = Скорость ввода**

Рисунок 1.13 – Схема конуса распыла топлива

Для этого во вкладке настроек области ввода частиц (Particle Injection Regions) необходимо выбрать конусообразный метод подачи топлива (Injection Method - Cone) и выбрать опцию - кольцевой конус (Cone Definition - Ring Cone). Затем нужно определить геометрические величины области ввода, её координаты и другие параметры: внутренний  $R_i$  (Inner Rad. of Plane) и внешний  $R_o$  (Outer Rad. of Plane) радиус плоскости ввода, координаты центра подачи топлива (Injection Centre), направление ввода (Injection Direction), скорость подачи (Injection Vel. Mag.), угол конуса (Cone Angle), количество впрыскиваемых частиц в единицу времени (Number of Positions). Также во вкладке настроек области ввода частиц задается расход топлива, как основное граничное условие для него, его температура и диаметр капель (рис. 1.14).

При таких настройках подача топлива осуществляется не с поверх-

ности, вместо этого внутри расчетной области генерируется кольцевой усеченный конус, толщина стенок которого зависит от указанных внутреннего и внешнего радиусов ( $R_i$  и  $R_o$  соответственно). Жидкие частички керосина вводятся в расчетную область, равномерно распределяясь в сгенерированном полом конусе, с заданным расходом, скоростью и диаметром капель.

Результат настроек графически изображен на рис. 1.15.

The screenshot shows a software configuration window for a spray model. It contains several sections with checkboxes and input fields:

- drop** (checked)
- Injection Method**: Option: Cone
- Cone Definition**:
  - Option: Ring Cone
  - Injection Centre: 0, 0.156, 0
  - Inner Rad. of Plane: 4.425 [mm]
  - Outer Rad. of Plane: 4.5 [mm]
- Injection Direction**:
  - Option: Cartesian Components
  - X Component: 1
  - Y Component: 0
  - Z Component: 0
- Injection Velocity**:
  - Option: Velocity Magnitude
  - Injection Vel. Mag.: 50 [m s<sup>-1</sup>]
  - Cone Angle: 50 [deg]
- Number Of Positions**:
  - Option: Direct Specification
  - Number: 1000
- Temperature** (checked):
  - Option: Value
  - Temperature: 300 [K]
- Particle Diameter Distribution** (checked):
  - Option: Specified Diameter
  - Diameter: 30 [micron]
- Particle Mass Flow Rate** (checked):
  - Mass Flow Rate: 0.012542 [kg s<sup>-1</sup>]

Рисунок 1.14 – Параметры конуса распыла и капель топлива

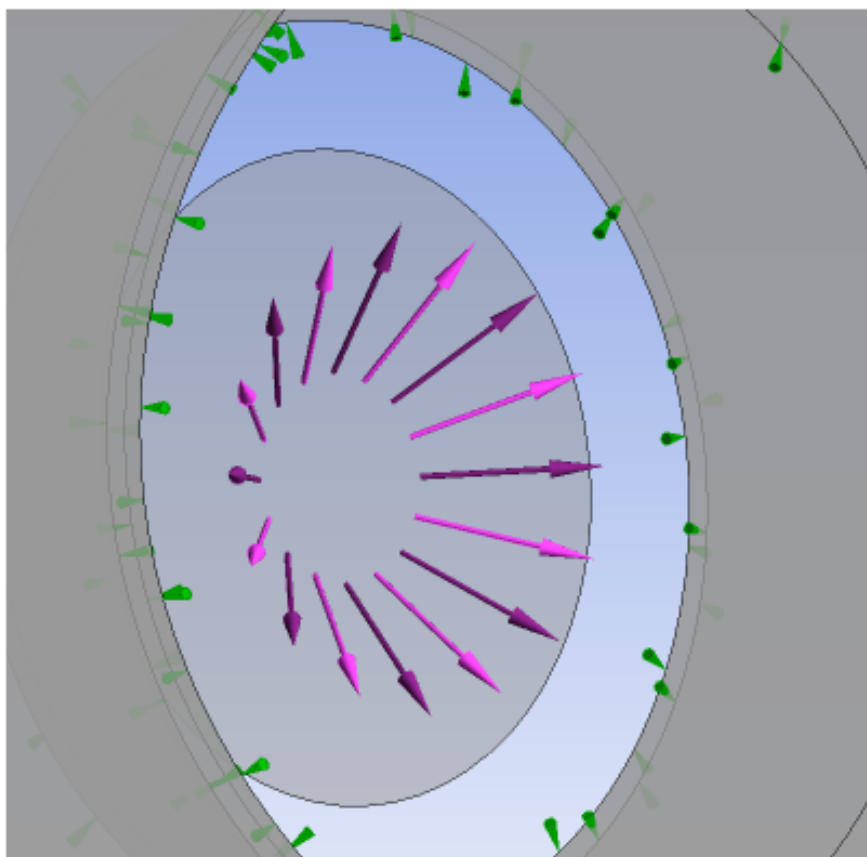


Рисунок 1.15 – Кольцевой конус распыла топлива

### Подача воздуха

Воздух, после сжатия в компрессоре, разделяется на первичный и вторичный поток. Первичный воздух поступает в зону горения жаровой трубы через двенадцать завихрителей, в которых установлены плавающие кольца, служащие для компенсации термических расширений жаровой трубы. Вторичный поток необходим для охлаждения стенок жаровой трубы и для уменьшения температуры продуктов сгорания на выходе из камеры, в зону горения он попадает через отверстия в секциях жаровой трубы и через щелевые зазоры между ними.

Чтобы смоделировать закрутку воздуха, прошедшего через фронтальное устройство, на границе расчетной области была выделена отдельная поверхность, с которой воздух подавался тангенциально. Для задания необходимого направления потока, во вкладке настроек граничных условий (Boundary Details) нужно выбрать цилиндрическую систему координат (Flow Direction - Cylindrical Components), определить величины осевой, радиальной и тангенциальной составляющих вектора направления потока (Axial, Radial, Theta Components) и ось закрутки (Axis Definition - Option - Two Points), которая проходит через центр фронтального устройства (рис. 1.16). Результат настроек графически изображен на рис. (1.17). На осталь-

ных границах подачи воздуха, направление было установлено по нормали к поверхности (Flow Direction - Normal to Boundary Condition). Также во вкладке настроек граничных условий для обоих потоков задается полное давление воздуха, как основное граничное условие для него, и его температура (рис. 1.18).

| Flow Direction     |                        |       |   |
|--------------------|------------------------|-------|---|
| Option             | Cylindrical Components |       |   |
| Axial Component    | 0.2                    |       |   |
| Radial Component   | 0.266                  |       |   |
| Theta Component    | 0.534                  |       |   |
| Axis Definition    |                        |       |   |
| Option             | Two Points             |       |   |
| Rotation Axis From | 0                      | 0.156 | 0 |
| Rotation Axis To   | 0.204                  | 0.156 | 0 |

Рисунок 1.16 – Задание направления потока

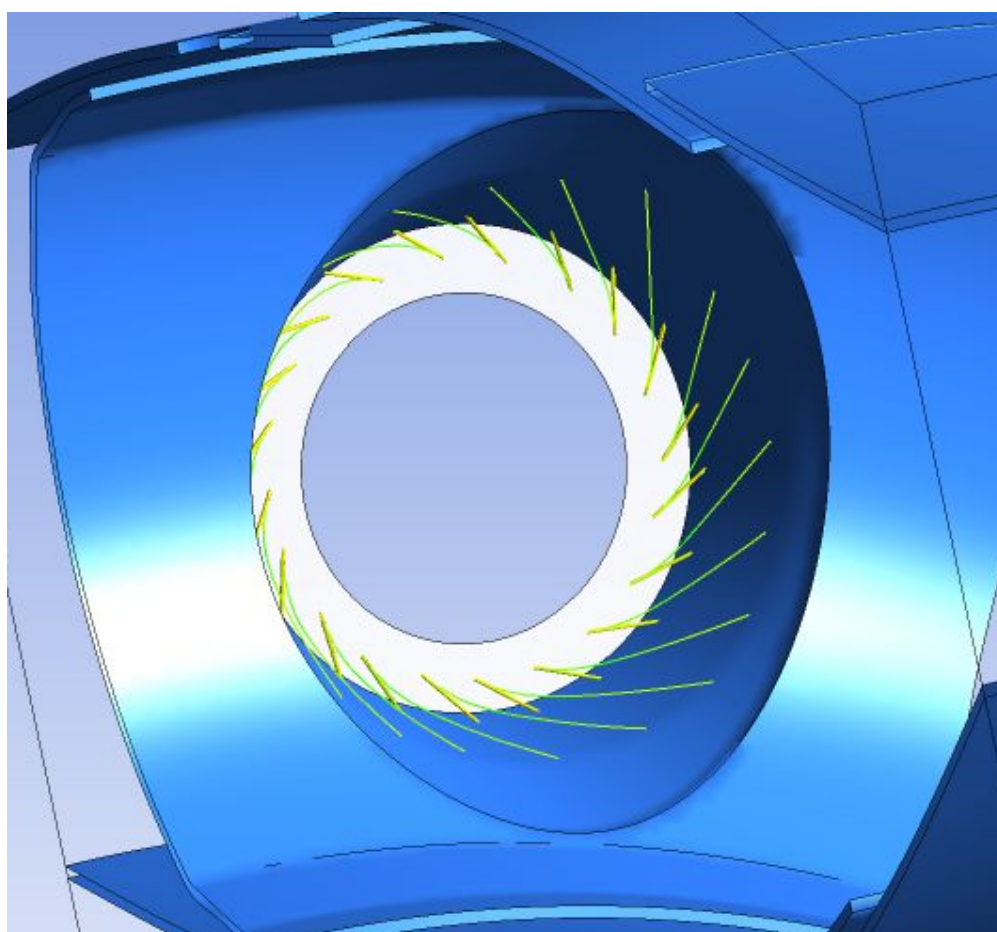


Рисунок 1.17 – Тангенциальная подача воздуха



| Basic Settings           | Boundary Details | Fluid Values            | Sources | Plot Options |
|--------------------------|------------------|-------------------------|---------|--------------|
| <b>Flow Regime</b>       |                  |                         |         |              |
| Option                   |                  | Subsonic                |         |              |
| <b>Mass And Momentum</b> |                  |                         |         |              |
| Option                   |                  | Total Pressure (stable) |         |              |
| Relative Pressure        |                  | 10 [atm]                |         |              |
| <b>Heat Transfer</b>     |                  |                         |         |              |
| Option                   |                  | Static Temperature      |         |              |
| Static Temperature       |                  | 600 [K]                 |         |              |

Рисунок 1.18 – Параметры воздуха на входе в КС

## Выходная граница и границы симметрии

Основным граничным условием на выходной границе расчетной области является массовый расход смеси (рис. 1.19).

Так как в постановке рассматривается не вся камера, а только тридцатиградусный сектор, необходимо определить границы симметрии. Здесь ими являются боковые поверхности расчетной области (рис. 1.20).

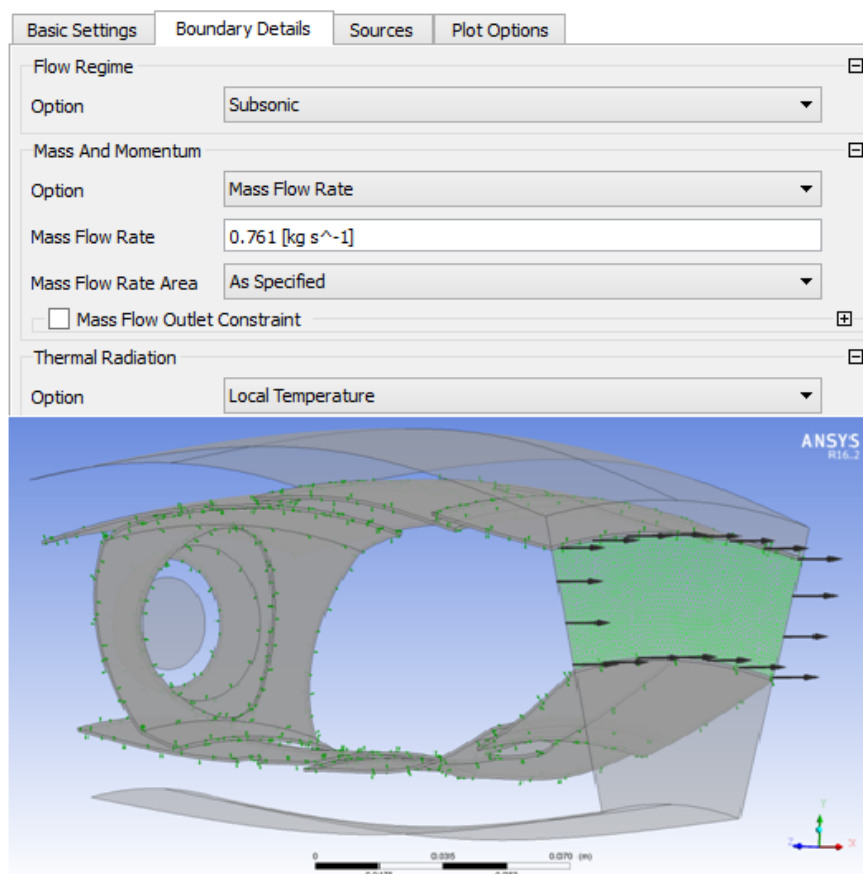


Рисунок 1.19 – Условие на выходной границе

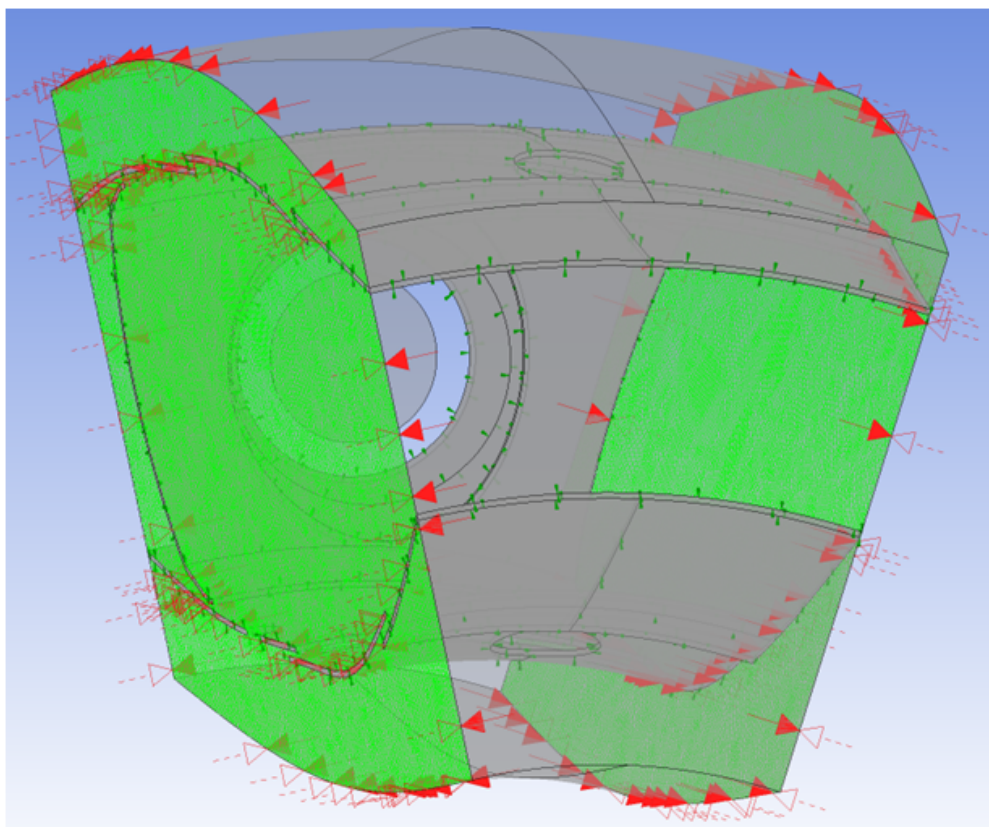


Рисунок 1.20 – Границы симметрии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов проведенных расчетов можно выделить следующие моменты, которые необходимо учитывать при моделировании горения топливно-воздушной смеси в задачах со схожей постановкой:

1) при создании геометрии камеры сгорания желательно строить не всю камеру целиком, а лишь отдельный сектор, что поспособствует существенному сокращению времени расчетов и затрат компьютерных ресурсов. Также, перед генерацией расчетной сетки, необходимо проверить построенную модель на наличие поврежденной геометрии;

2) при генерации расчетной сетки необходимо уделять внимание её качеству, а именно критериям качества Orthogonal Quality (ортогональность ячеек) и Skewness (скошенность ячеек);

3) результаты расчетов будут слабо зависеть от выбора модели турбулентности, но при моделировании горения в прямоточных камерах сгорания кольцевого типа наилучшим выбором будет модель K-Epsilon;

4) наилучшей комбинацией основных граничных условий является задание массового расхода топлива на входе, массового расхода смеси на выходе и полное давление воздуха на входе в расчетную область.