

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра ракетных двигателей

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ЖИДКОСТНЫХ
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению курсового проекта по дисциплине
«Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей»
для студентов специальности
24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»
(специализация «Проектирование жидкостных ракетных двигателей»)
очной формы обучения

Часть 2

Воронеж 2023

УДК 629.7
ББК

Составители: Д. П. Шматов, Т. А. Башарина, И. В. Акользин, А. В. Левина

Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей: методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (специализация «Проектирование жидкостных ракетных двигателей») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Д.П. Шматов, Т.А. Башарина, И.В. Акользин, А.В. Левина. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. - 40 с. – Часть 2.

Разработанные методические указания предназначены для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», выполняющих курсовой проект по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей».

Издание предназначено для студентов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ТиРЖРД_КП_Ч2_2023.pdf

УДК 629.7
ББК

Рецензент – А. В. Кретинин, д-р техн. наук, проф. кафедры нефтегазового оборудования и транспортировки

Издается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим элементом ракетно-космической системы является двигательная установка (ДУ) с жидкостным ракетным двигателем (ЖРД). Проектирование ДУ – важный и наиболее трудоемкий этап в создании космических ракет.

В методических указаниях представлены теоретические и практические материалы по темам, которые предусмотрены для решения курсового проекта по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей».

Материал составлен таким образом, чтобы его изучение способствовало усвоению теоретических основ дисциплины, а также закреплению приобретенных студентами навыков по расчетам ЖРД.

Курсовой проект призван научить студентов сознательно пользоваться знаниями, приобретенными при изучении предшествующих дисциплин, умении пользоваться литературными источниками.

1 Расчет и проектирование системы смесеобразования

Система смесеобразования осуществляет ввод, распыление, смешение и первоначальное распределение компонентов топлива или продуктов газогенерации в камере сгорания (КС). Система смесеобразования должна обеспечивать высокую полноту сгорания топлива в КС, надёжную защиту стенок камеры от прогара и устойчивое протекание рабочего процесса.

При расчёте и проектировании системы смесеобразования камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) целесообразно придерживаться следующего общего порядка.

1. Обоснованно выбрать форму и тип смесительной головки камеры, предварительно определить её конструктивную схему.

2. Выяснить, какие устройства кроме форсунок нужно расположить на смесительной головке камеры, чтобы предусмотреть для них места установки.

3. Выбрать тип форсунок и схему расположения их на днище смесительной головки камеры.

4. Определить наружный диаметр форсунок и шаг между ними.

5. Вычертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 схему расположения форсунок на днище смесительной головки камеры диаметром $D_{\text{гол}}$. Для цилиндрической камеры сгорания $d_{\text{к}} = D_{\text{гол}}$.

6. Определить количество форсунок горючего (Г) $n_{\text{г}}$, окислителя (О) $n_{\text{ок}}$ или генераторного газа $n_{\text{гг}}$ или же двухкомпонентных форсунок в ядре потока $n_{\text{я}}$ и пристеночном слое $n_{\text{пр}}$.

7. Определить массовые расходы компонентов топлива через форсунку О, форсунку Г или двухкомпонентную форсунку.

8. Провести проектный гидрогазодинамический расчёт выбранного типа форсунок, корректно принимая ряд проектных решений. Проектируемая форсунка должна обеспечить требуемый массовый расход компонентов топлива $\dot{m}_{\text{ф}}$.

9. После корректировки схемы, расположения, типа и геометрических размеров ядерных и пристеночных форсунок следует провести их проектный гидрогазодинамический расчёт. При этом особое внимание следует уделить сохранению выбранного оптимального соотношения компонентов топлива для каждого характерного смесительного элемента головки.

10. Используя принятые проектные решения и результаты проектных расчётов, вычертить в масштабе 10:1 поперечные и продольные разрезы форсунок О и Г или генераторного газа, ориентируясь на существующие и выбранные схемы и прототипы.

1.1 Выбор формы, типа и конструктивной схемы смесительной головки. Определение размеров форсунок и вычерчивание схемы их расположения

Смесительная головка является главным элементом камеры ЖРД, обеспечивающим хорошую организацию смесеобразования в КС.

При проектировании смесительной головки камеры должны быть выбраны форма, тип и конструктивная схема головки, осуществлено необходимое размещение и надёжное крепление выбранного типа форсунок. Конкретный выбор формы и типа смесительной головки камеры в основном зависит от размерности двигателя, его абсолютных и удельных параметров, традиции той или иной проектирующей организации, накопленного разработчиками опыта создания двигателя – прототипа.

Наименьшее расстояние между осями центробежных форсунок на смесительной головке определяется наружным диаметром форсунки D_{ϕ} и необходимостью сохранения прочности днищ смесительной головки, ослабленных сверлениями под форсунки. Оно находится в пределах $H = 12...30$ мм [1].

В первом приближении можно считать, что шаг между центробежными форсунками H определяется эмпирическим уравнением (1.1) Число форсунок в ряду и на смесительной головке при равенстве шагов по радиусу и окружности приведены в табл. 1.1.

$$H = \sqrt{D_{\text{гол}}}, \quad (1.1)$$

Диаметр плоской смесительной головки КС для цилиндрической КС:

$$D_{\text{гол}} = d_{\text{к}}, \quad (1.2)$$

Поэтому для цилиндрической КС:

$$H = \sqrt{D_{\text{к}}}, \quad (1.3)$$

Внешний диаметр струйно-центробежной форсунки при шаге между ними $H = 15 \dots 20$ мм:

$$D_{\phi} = 0,75 \cdot H, \quad (1.4)$$

Расстояние между форсунками в радиальном направлении (5.5):

$$\Delta_{\phi} = H - D_{\phi}, \quad (1.5)$$

Число рядов форсунок:

$$i = \frac{r_k - H}{H}, \quad (1.6)$$

Таблица 1.1

Число форсунок в ряду и на смесительной головке при равенстве шагов по радиусу и окружности

Номер окружности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число форсунок в ряду	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Суммарное число форсунок	7	19	37	61	91	127	169	217	271	331

2 Определение массовых расходов

Массовый расход O через одну ядерную форсунку:

$$\dot{m}_{\phi.ок.я} = \frac{\dot{m}_{ок.я}}{n_{ок.я}}, \quad (1.7)$$

где $\dot{m}_{ок.я}$ - массовый расход O через ядро потока камеры, $n_{ок.я}$ - число ядерных однокомпонентных форсунок O .

Массовый расход Γ через одну ядерную форсунку:

$$\dot{m}_{\phi.г.я} = \frac{\dot{m}_{г.я}}{n_{г.я}}, \quad (1.8)$$

где $\dot{m}_{г.я}$ - массовый расход Γ через ядро потока камеры, $n_{г.я}$ - число ядерных однокомпонентных форсунок Γ .

Массовый расход Γ через одну пристеночную форсунку:

$$\dot{m}_{\phi.г.пр} = \frac{\dot{m}_{г.пр}}{n_{г.пр}}, \quad (1.9)$$

где $\dot{m}_{г.пр}$ - массовый расход Γ через пристеночный слой потока камеры; $n_{г.пр}$ - число пристеночных однокомпонентных форсунок Γ .

Массовый расход O через одну пристеночную форсунку или форсунку переходной зоны:

$$\dot{m}_{\text{ф.ок.пр}} = \frac{\dot{m}_{\text{ок.пр}}}{n_{\text{ок.пр}}}, \quad (1.10)$$

где $\dot{m}_{\text{ок.пр}}$ - массовый расход O через пристеночный слой потока камеры, $n_{\text{ок.пр}}$ – число пристеночных однокомпонентных форсунок O .

Обычно расходы компонентов топлива через однокомпонентную форсунку находятся в пределах $\dot{m}_{\text{ф.г}} = 30 \dots 300$ г/с, расходы компонентов через двухкомпонентную форсунку могут достигать значений $2,5 \dots 3$ кг/с, минимально возможные перепады давлений в форсунках $\Delta p_{\text{ф}} = 0,3$ МПа, обычный диапазон перепадов давлений на форсунках составляет $\Delta p_{\text{ф}} = 0,3 \dots 1,5$ МПа.

3 Гидрогазодинамический расчет и проектирование двухкомпонентных топливных форсунок

Форсунка – это устройство, предназначенное для подачи (впрыска) в КС ракетного двигателя или ГГ компонентов топлива, их распыления, перемешивания и первоначального распределения по объёму КС.

Классификация форсунок, применяемых в ЖРД, приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Классификация форсунок

Признак	Тип форсунок
Особенности устройства и конструкции	струйные
	центробежные
	щелевые
	шнековые
Агрегатное состояние подаваемых компонентов топлива	жидкостные
	газовые
	газожидкостные
Число компонентов, вводимых в КС одной форсункой	однокомпонентные
	двухкомпонентные

Центробежная форсунка представляет собой форсунку с искусственно созданной закруткой струи жидкости или газа. По способу закрутки потока компонента центробежные форсунки бывают тангенциальные и шнековые.

Открытая шнековая центробежная форсунка имеет радиус сопла, равный радиусу вихревой камеры (рис. 3.1). Закрутка создается с помощью специального шнека с винтовой нарезкой на наружной поверхности.

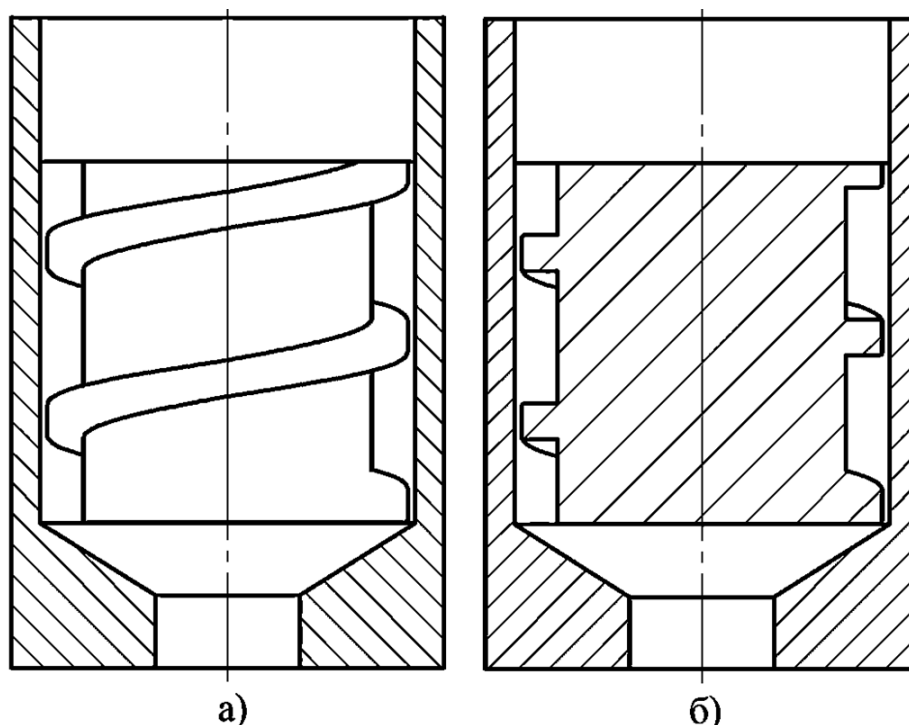


Рис.3.1. Схема открытой шнековой центробежной форсунки:
 а – вид с завихрителем (шнек); б – вид в разрезе

Двухкомпонентная форсунка является элементарным смесителем или смесительным элементом, т.к. обеспечивает смешение компонентов топлива в требуемом соотношении. Они представляют собой конструктивно блок двух однокомпонентных форсунок. Возможны самые различные конструктивные сочетания центробежной, струйной и щелевой форсунок. Далее будут рассмотрены различные конструктивные варианты двухкомпонентных форсунок.

Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внешним смешением состоит из наружного и внутреннего контуров (рис. 5.2). Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

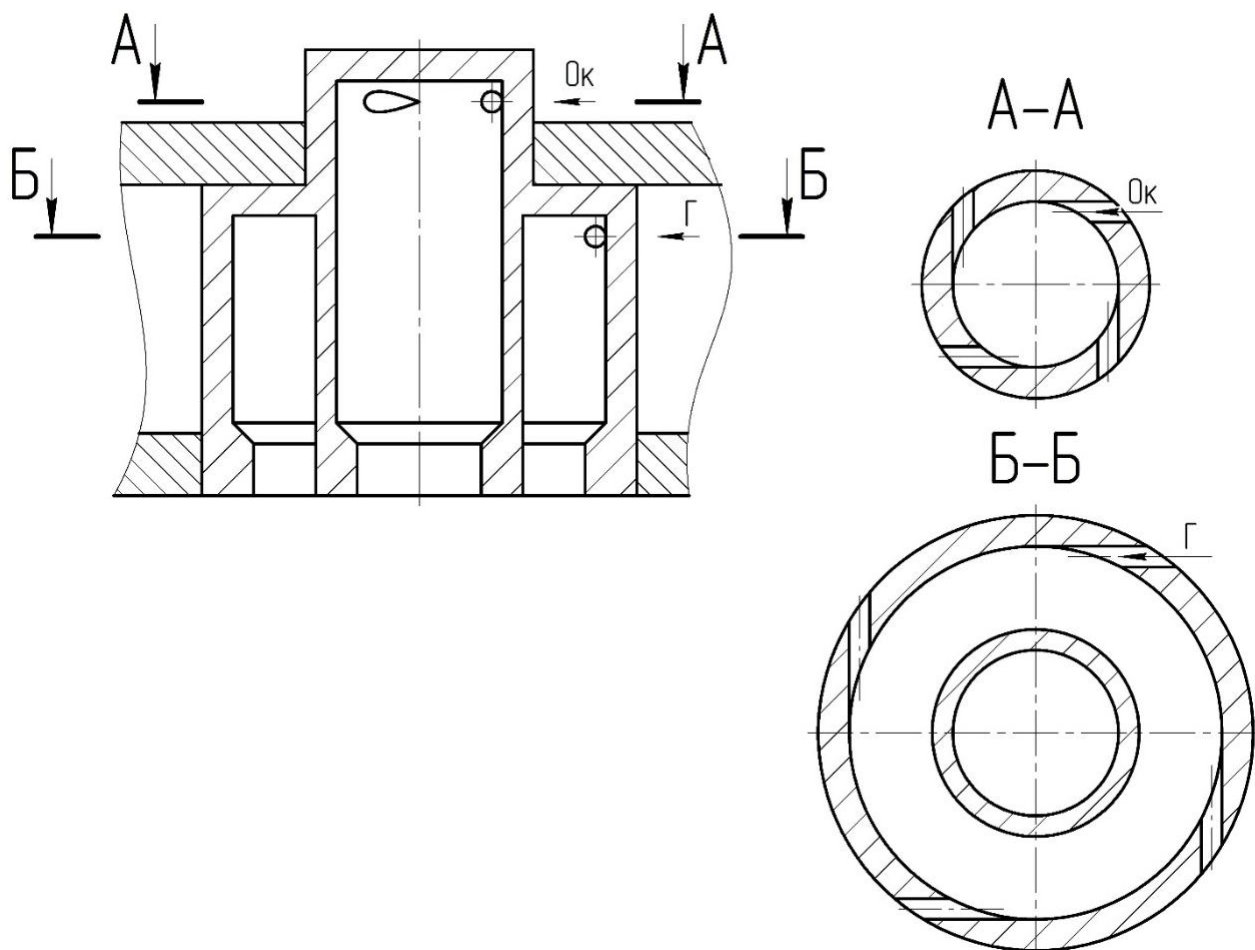


Рис. 3.2. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внешним смешением

Наружный контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внешним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку Г. Внутренний контур форсунки представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку О.

Последовательность проектного расчёта форсунки представлена в [1, раздел 1.6.3].

Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внутренним смешением (или эмульсионная форсунка) состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур работает и рассчитывается независимо от наружного, а наружный контур рассчитывается с учётом работы внутреннего контура (рис. 5.3.).

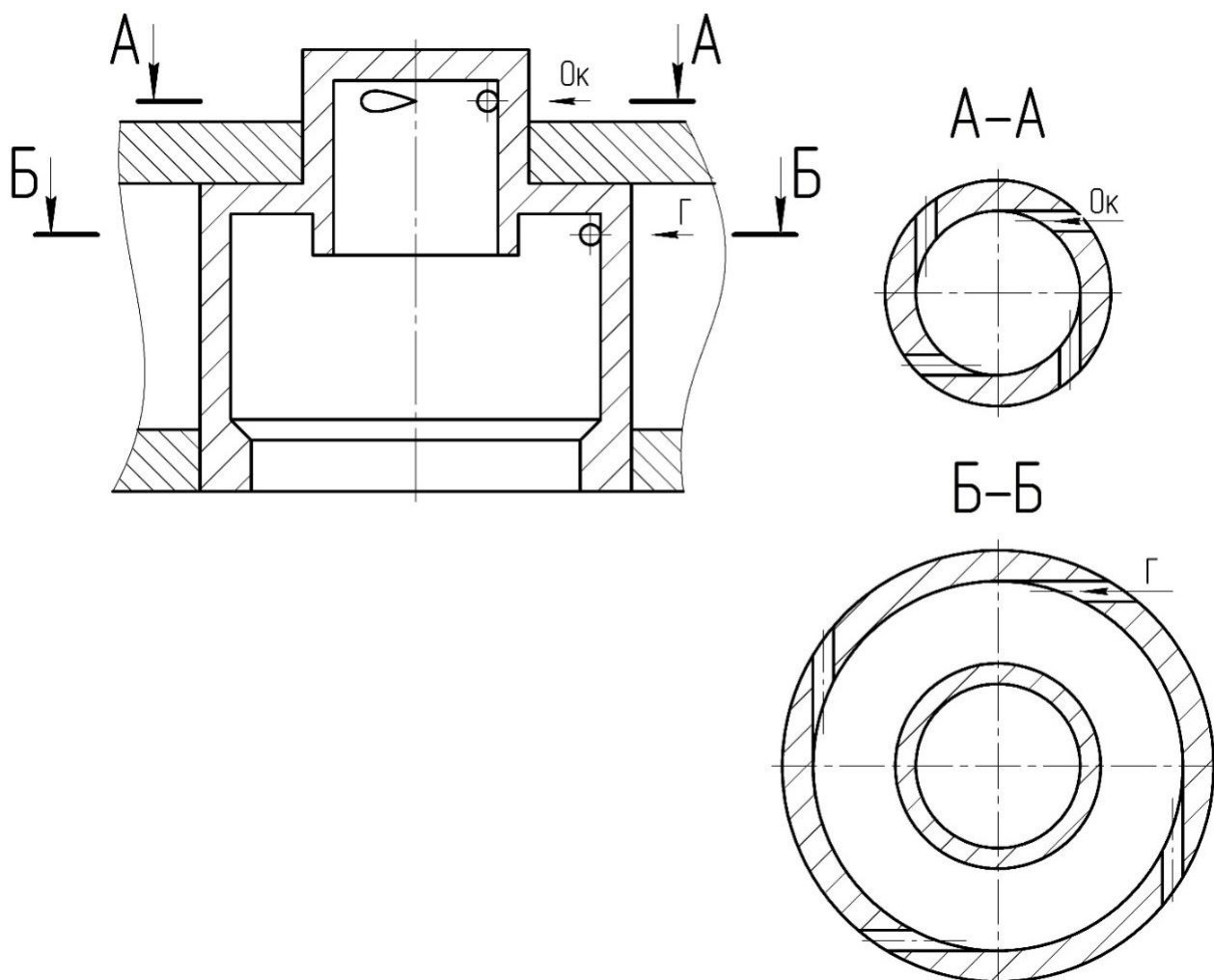


Рис. 3.3. Двухкомпонентная центробежно-центробежная жидкостная форсунка с внутренним смешением

Наружный контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку Γ , в камеру закручивания которой со стороны газового вихря подаётся ещё и второй компонент – O из внутреннего контура двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки. Эти компоненты смешиваются уже внутри камеры закручивания наружного контура, образуя эмульсию. Эта эмульсия и вытекает из форсунки в виде пелены, распадаясь на капли.

Внутренний контур двухкомпонентной центробежно-центробежной жидкостной форсунки с внутренним смешением представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку O .

Проектный расчет наружного контура форсунки проводится в соответствии с [1, раздел 2.5.1], а внутреннего – [1, раздел 2.5.2].

Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением является одной из самых широко используемых в ЖРД со схемой «газ-жидкость» с дожиганием генераторного газа на

самовоспламеняющихся компонентах топлива (рис. 5.4.). Форсунка состоит из внешнего и внутреннего контуров. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

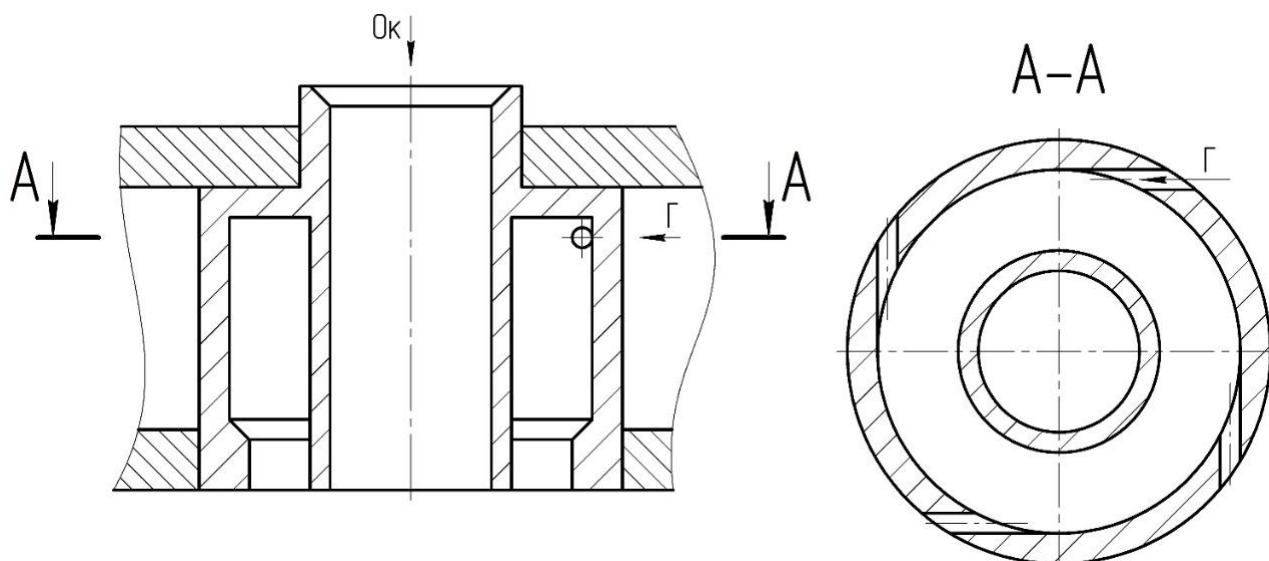


Рис. 3.4. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внешним смешением

Внутренний контур форсунки с внешним смешением представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку O (генераторного газа окислительного $\Gamma\Gamma$), а наружный – однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку Γ .

Проектный расчет наружного контура форсунки проводится в соответствии с [1, раздел 2.6.1], а внутреннего – [1, раздел 2.6.2].

Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внутренним смешением используется в ЖРД, работающих по схеме «газ-жидкость» на несамовоспламеняющихся компонентах с дожиганием генераторного газа (рис. 5.5.).

Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров. Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку O , т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур представляет собой однокомпонентную центробежную жидкостную форсунку Γ . Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

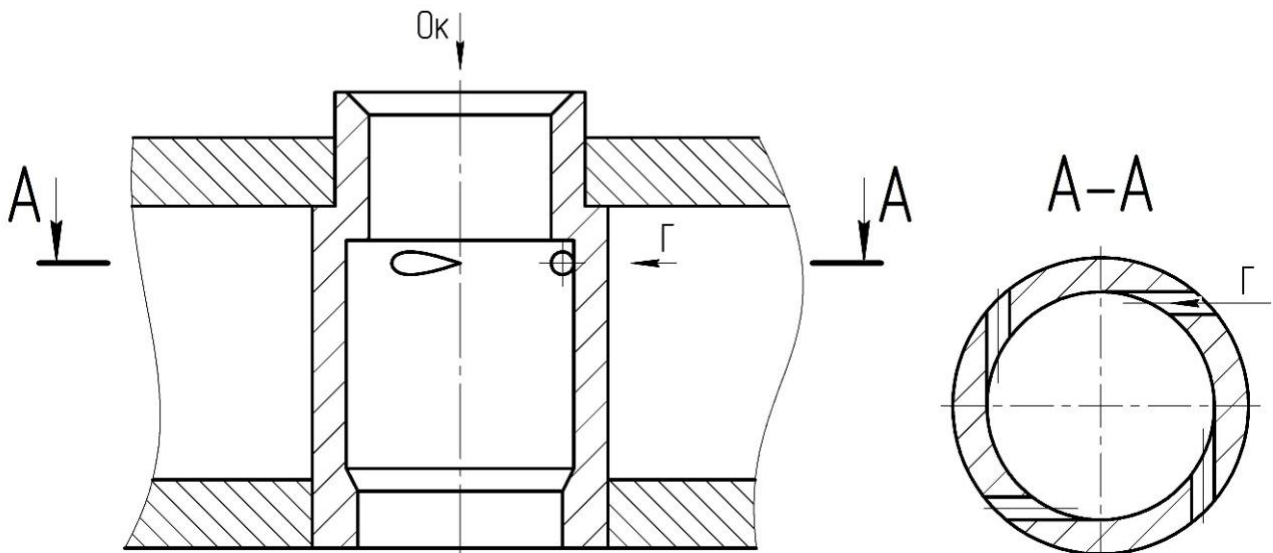


Рис. 3.5. Двухкомпонентная струйно-центробежная газожидкостная форсунка с внутренним смешением

Проектный расчет форсунки производится по аналогии с расчетом двухкомпонентной струйно-центробежной газожидкостной форсунки с внешним смешением.

Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением применяется в схемах «газ-газ» с дожиганием генераторного газа на самовоспламеняющихся компонентах топлива (рис. 5.6.). Она состоит из внешнего и внутреннего контуров.

Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку O , т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур - однокомпонентную кольцевую струйную газовую форсунку Γ , т.е. восстановительного генераторного газа. Оба контура работают и рассчитываются независимо друг от друга.

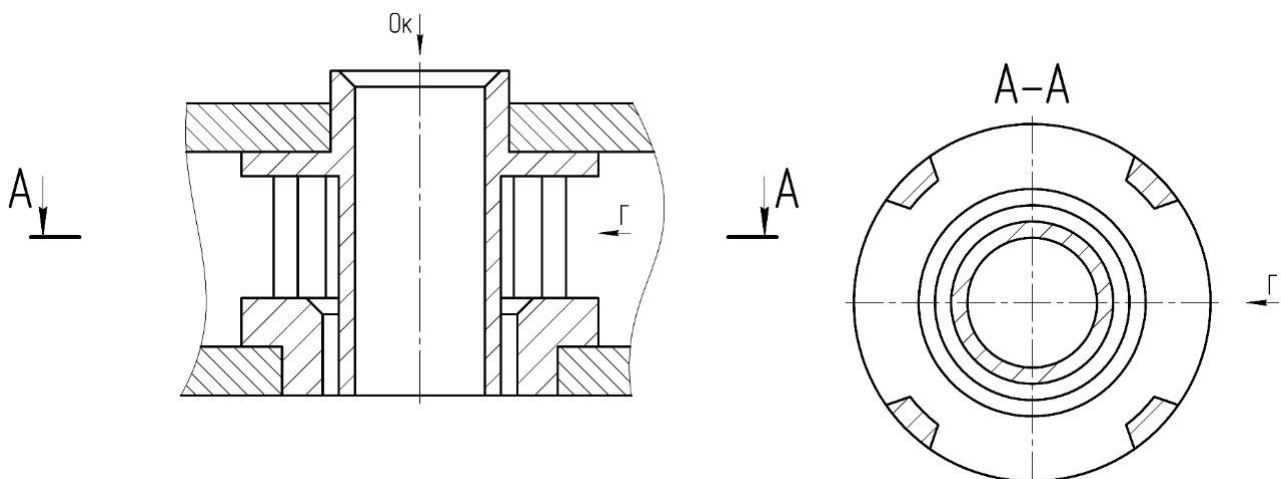


Рис. 3.6. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внешним смешением

Проектный расчет форсунки проводится в соответствии с [1, раздел 2.8].

Двухкомпонентная струйно-струйная газовая форсунка с внутренним смешением применяется в ЖРД с рабочим процессом по схеме «газ-газ» с дожиганием генераторного газа на несамовоспламеняющихся компонентах рабочего тела (рис. 5.7). Форсунка состоит из внешнего и внутреннего контуров.

Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку О, т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку, или форсунки Г (восстановительного генераторного газа). Оба контура рассчитываются независимо друг от друга.

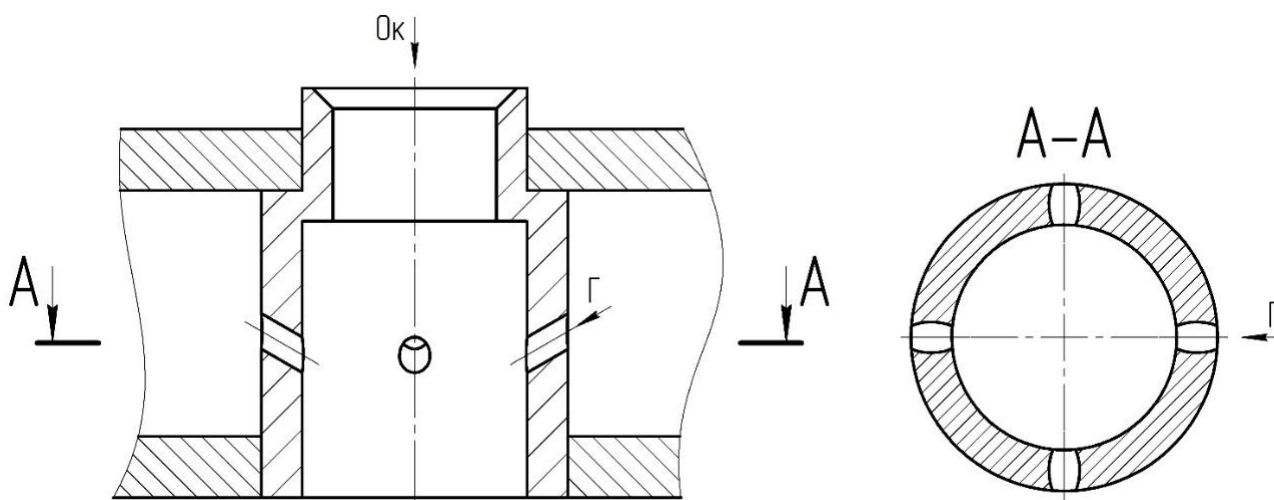


Рис. 3.7. Двухкомпонентная струйно-струйная газовая или газожидкостная форсунка с внутренним смешением

Проектный расчет форсунки проводится в соответствии с [1, раздел 2.9].

Двухкомпонентная струйно-струйная газожидкостная форсунка с внутренним смешением представлена на рис. 5.7., работающая на несамовоспламеняющихся компонентах топлива (криогенных) в схеме «газ-жидкость». Форсунка состоит из наружного и внутреннего контуров.

Внутренний контур представляет собой однокомпонентную струйную газовую форсунку О, т.е. окислительного генераторного газа. Наружный контур - однокомпонентную струйную жидкостную форсунку (или форсунки) Г. Смешение газового О и жидкого Г происходит внутри двухкомпонентной форсунки. Из сопла форсунки вытекает газожидкостная струя топливной смеси. Оба контура такой форсунки рассчитываются независимо друг от друга, причём расчёт начинается с внутреннего контура.

Проектный расчет форсунки проводится в соответствии с [1, раздел 2.10].

4 Проведение численного моделирования процесса смесеобразования в смесительном элементе ЖРД

4.1 Подготовка геометрии в ANSYS SpaceClaim

По имеющейся 3D-модели смесительного элемента (далее – форсунки) (рис. 4.1) строим область течения рабочих сред с помощью функции «Volume Extract» (вкладка «Prepare», рис. 4.2).



Рис. 4.1. 3D-модель форсунки



Рис. 4.2. Функция Volume Extract во вкладке Prepare

Выбираем крайние поверхности (вход и выход горючего и окислителя, рис. 4.3), нажимаем третью сверху кнопку, выбираем внутренние поверхности и нажимаем галочку (рис. 4.4).

Select faces that enclose a region, then click the Select Seed Face tool guide to continue.

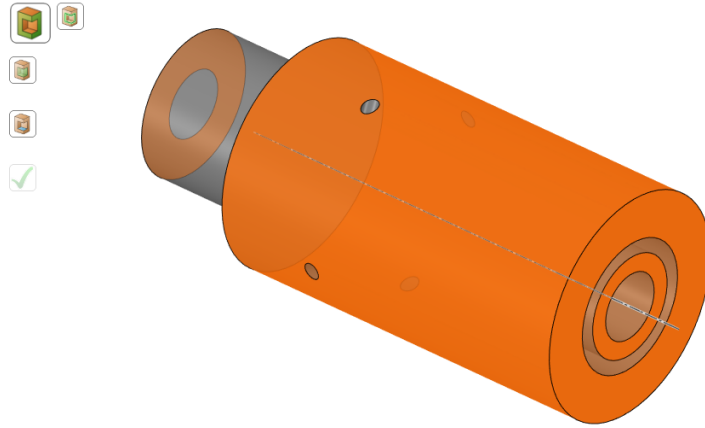


Рис. 4.3. Крайние поверхности форсунки (вход и выход)

Select a face that lies within the volume you want to enclose

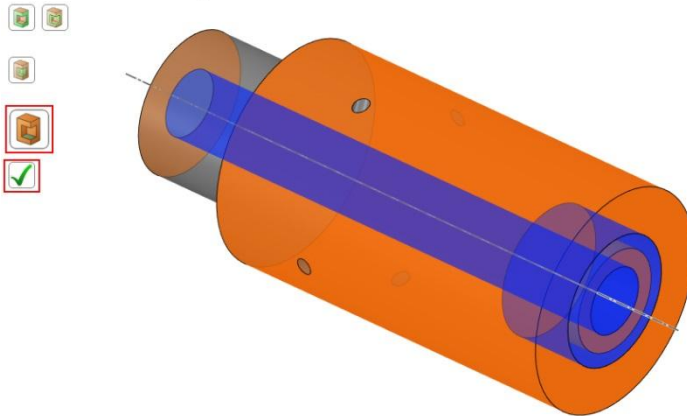


Рис. 4.4. Внутренние поверхности форсунки

Полученный результат приведен на рис. 4.5. После этого металлическую часть форсунки можно удалить.

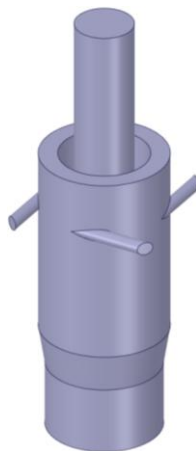


Рис. 4.5. Проточная часть форсунки

Далее необходимо достроить входные участки диаметром как 2 диаметра форсунки и расчетную область таким же диаметром и длиной как 10 диаметров форсунки (рис. 4.6).

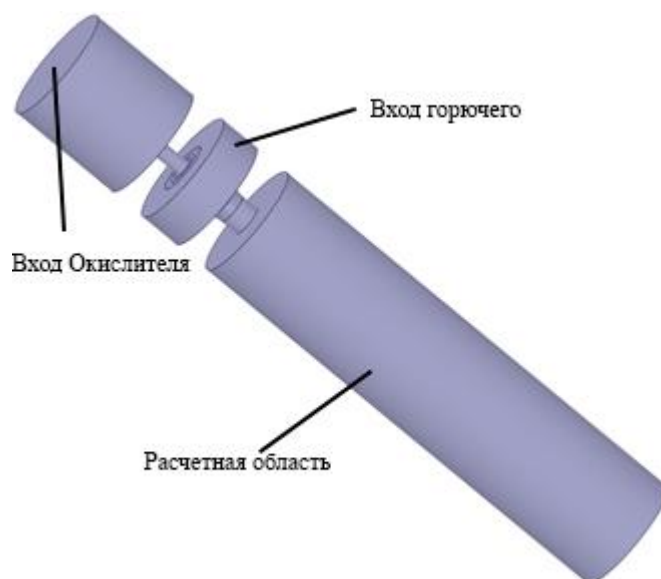


Рис. 4.6. Проточная часть форсунки с расчетной областью

4.2 Построение конечно-элементной сетки в ANSYS Meshing

Для начала необходимо сделать Named Selections (наименование поверхностей). Их будет 4: вход окислителя («Inlet O», рис. 4.7), вход горючего («Inlet G», рис. 4.8), выход («Outlet», рис. 4.9) и стенки («Wall», рис. 4.10). Чтобы сделать наименование поверхности, необходимо ее выбрать, нажать правую кнопку мыши и выбрать функцию «Create Named Selection» (горячая клавиша «N», рис. 4.11).

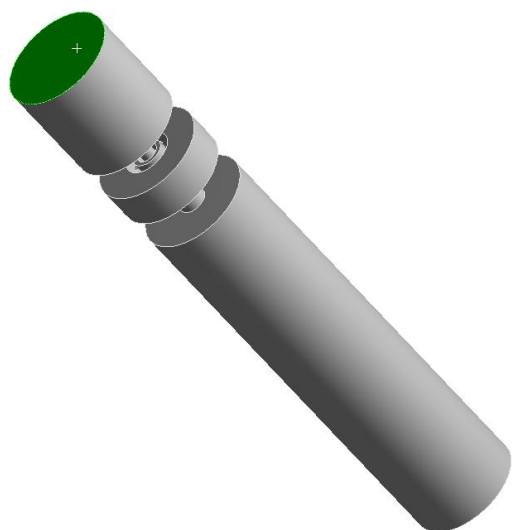


Рис. 4.7. Named Selection «Inlet O»



Рис. 4.8. Named Selection «Inlet G»

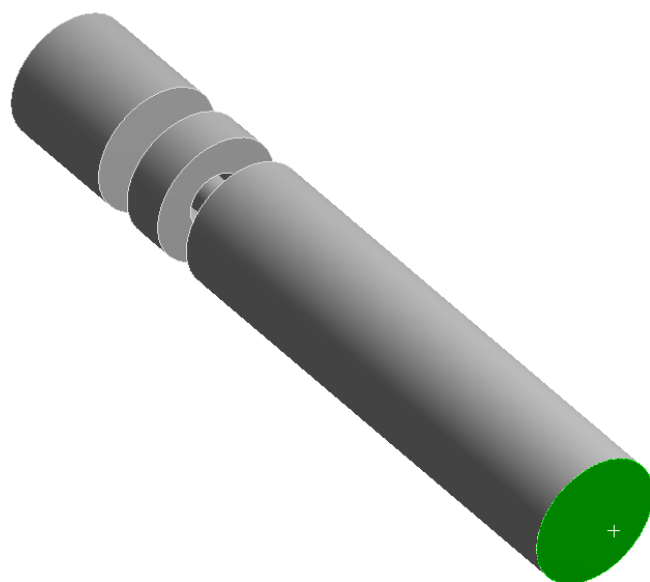


Рис. 4.9. Named Selection «Outlet»

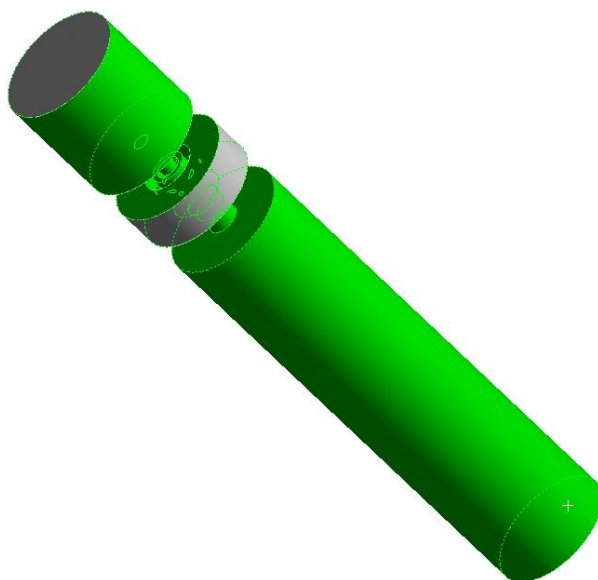


Рис. 4.10. Named Selection «Wall»

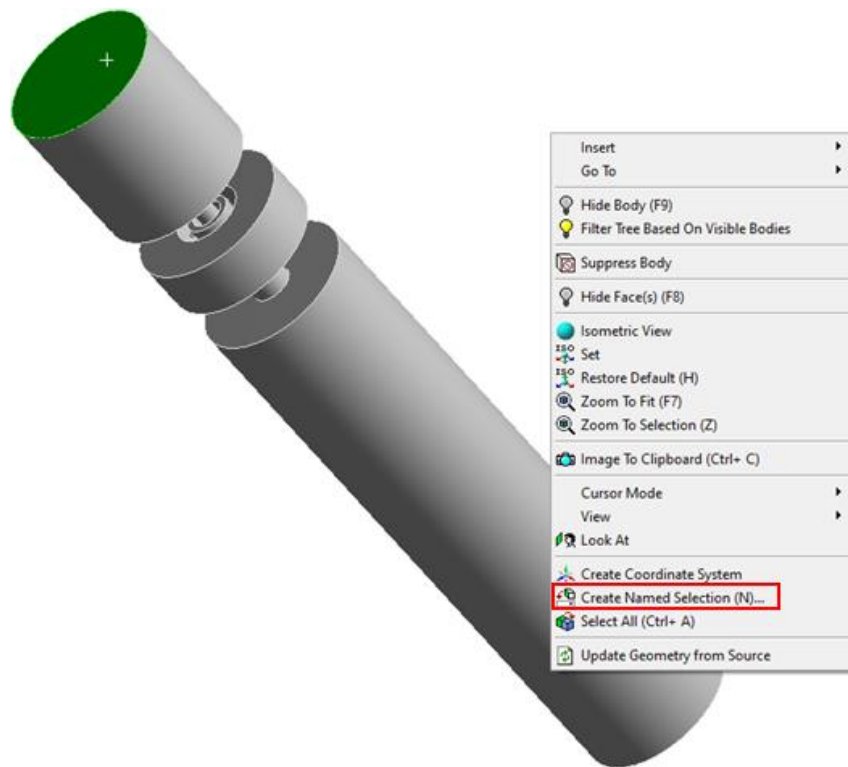


Рис. 4.11. Функция «Create Named Selection»

Далее в дереве нанимаем на вкладку Mesh. Необходимо настроить параметры сетки согласно табл. 4.1 и рис. 4.12.

Таблица 1

Основные характеристики сеточной модели

Параметр	Значение
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Order	Linear
Element Size, мм	0,5
Capture Curvature	Yes
Capture Proximity	Yes
Num cells Across Gap	5
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,2
Maximum Layers	10
Growth Rate	1,2

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Display	
Display Style	Use Geometry Setting
<input type="checkbox"/> Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	0,5 mm
<input type="checkbox"/> Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1, mm)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (2,5e-003 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (5,e-003 mm)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,e-003 mm)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Bounding Box Diagonal	123,29 mm
Average Surface Area	440,24 mm ²
Minimum Edge Length	2,0921 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
<input type="checkbox"/> Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Sele...
Named Selection	Wall
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,2
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Рис. 4.12. Основные характеристики сеточной модели

После настройки параметров сетки нажимаем сверху кнопку «Generate Mesh». Сетка, полученная в результате построения, может оказаться излишне мелкой или излишне крупной. Оценить размерность сетки возможно по количеству узлов сетки (nodes) во вкладке statistics – рекомендованное число узлов сетки для данного вида расчетов – от 500000 до 3000000. В случае невыполнения данного условия рекомендуется соответственно уменьшить или увеличить Element Size.

4.3 Граничные условия

После получения конечно-элементной сетки необходимо указать модели веществ, используемых в качестве рабочих тел. Указанные модели внесены во внутренние библиотеки ANSYS CFX.

Необходимо из подходящей библиотеки добавить требуемые для расчета модели веществ (материалы). Для этого надо нажать правую кнопку мыши по вкладке «Materials», выбрать функцию «Import Library Data» (рис. 4.13). Ищем и добавляем необходимые материалы.

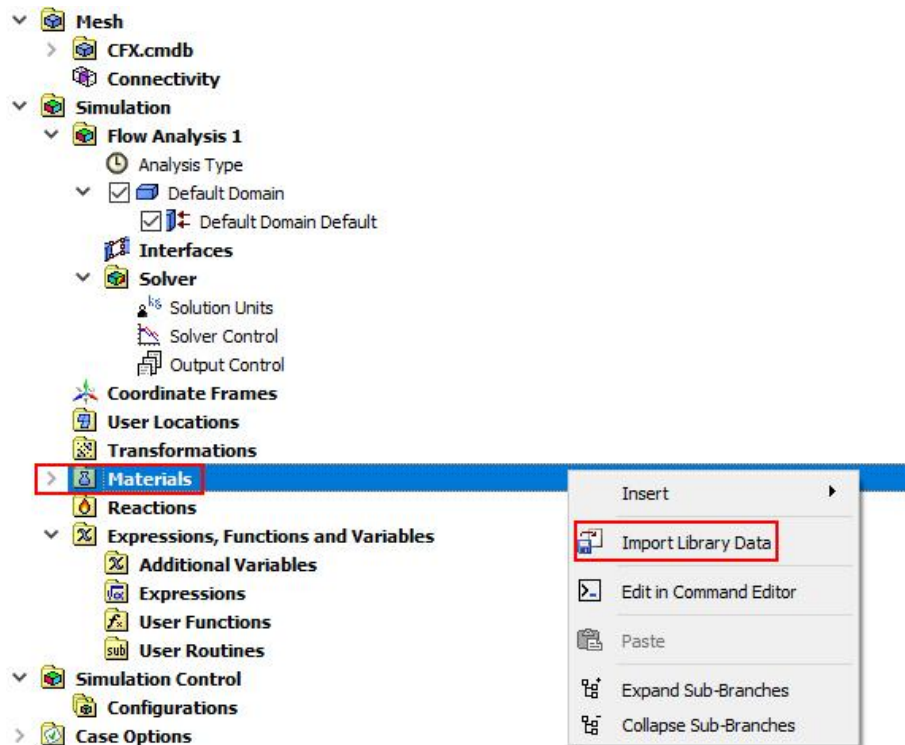


Рис. 4.13. Добавление материалов

Нажимаем правую кнопку мыши по вкладке «Materials» и выбираем «Insert», «Material» (рис. 4.14), называем новый материал «Mixture».

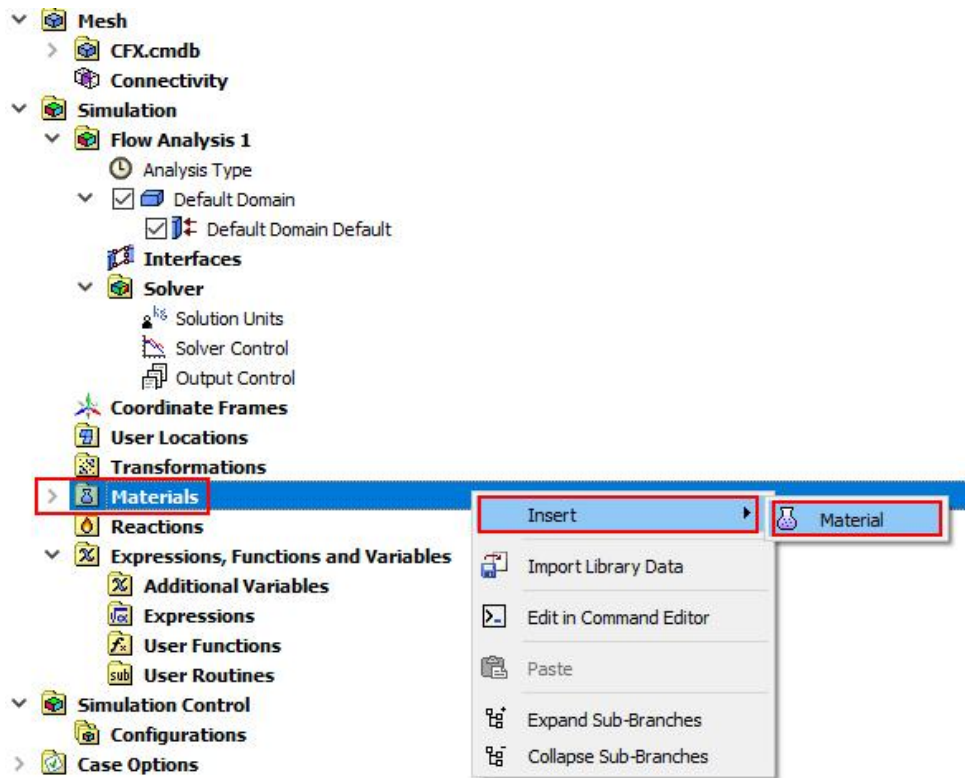


Рис. 4.14. Создание материала

В «Option» выбираем «Variable Composition Mixture» (рис. 4.15), в «Materials List» выбираем необходимые материалы.

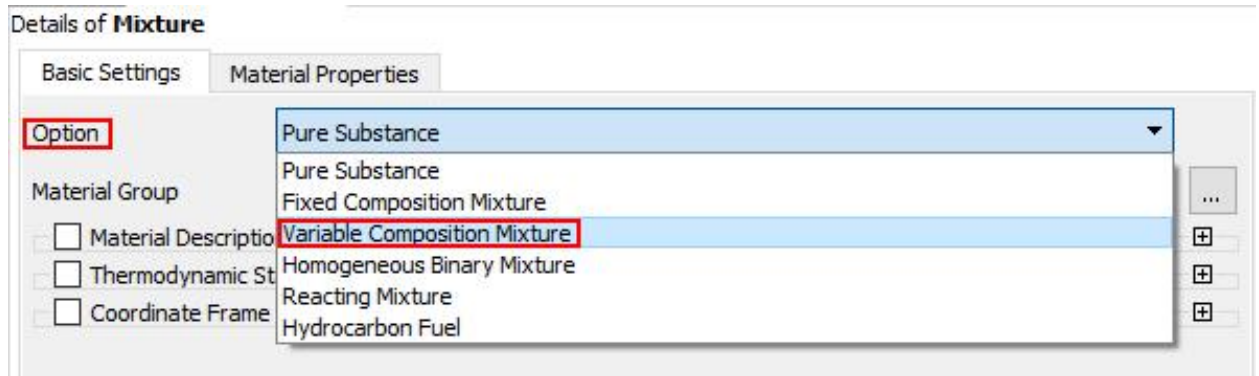


Рис. 4.15. Basic Settings

Во вкладке «Mixture Properties» необходимо включить опции «Mixture Properties», «Equation Of State» и «Specific Heat Capacity» (рис. 4.16). Слева снизу нажимаем кнопку «ОК».

Details of **Mixture**



Рис. 4.16. Mixture Properties

Заходим в домен (Default Domain). Выбираем материал Mixture (рис. 4.17)

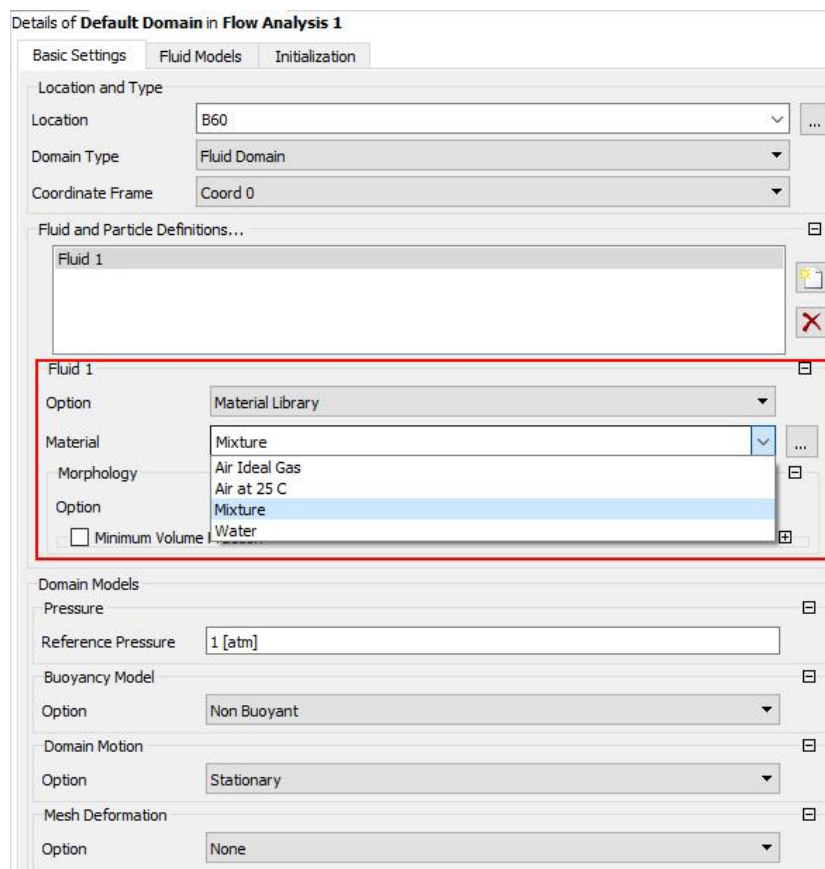


Рис. 4.17. Default Domain Basic Settings

Во вкладке «Fluid Models» в «Heat Transfer» выбираем опцию «Total Energy», в «Turbulence» выбираем опцию «Shear Stress Transport» (рис. 4.18). В «Component Models» выбираем для окислителя опцию «Constraint», для горючего выбираем опцию «Transport Equation» (рис. 4.19 и 4.20). Нажимаем кнопку «ОК».

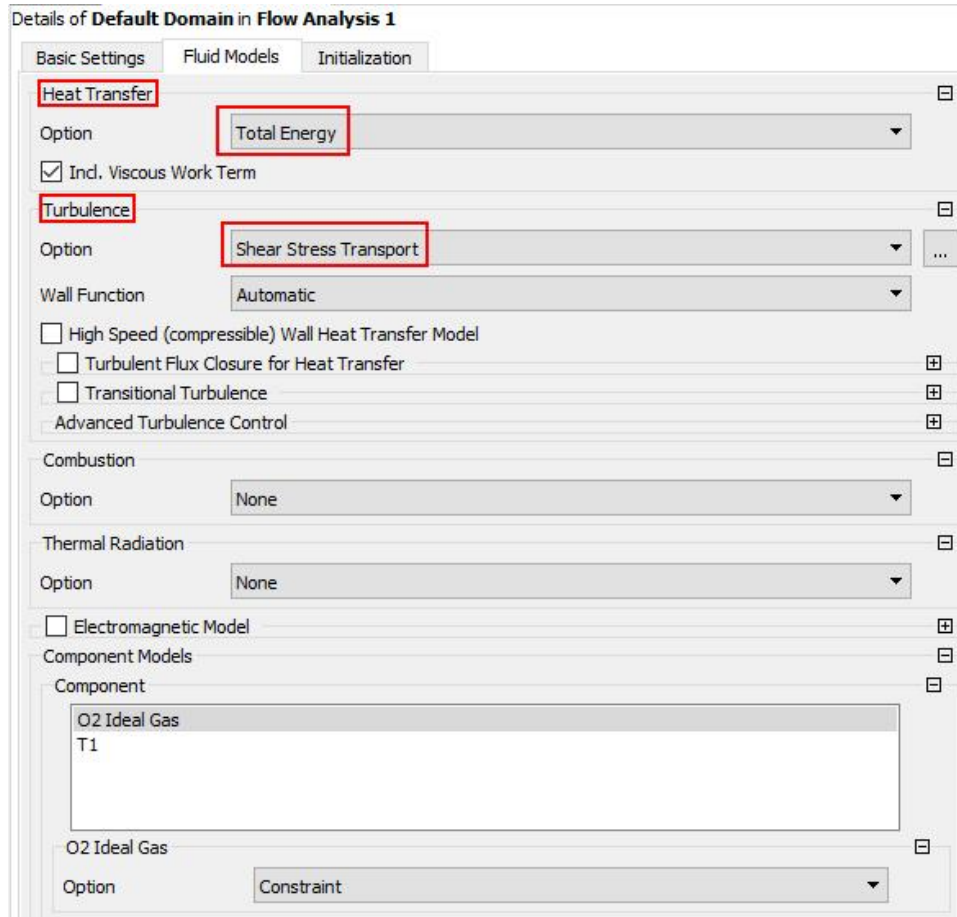


Рис. 4.18. Fluid Models

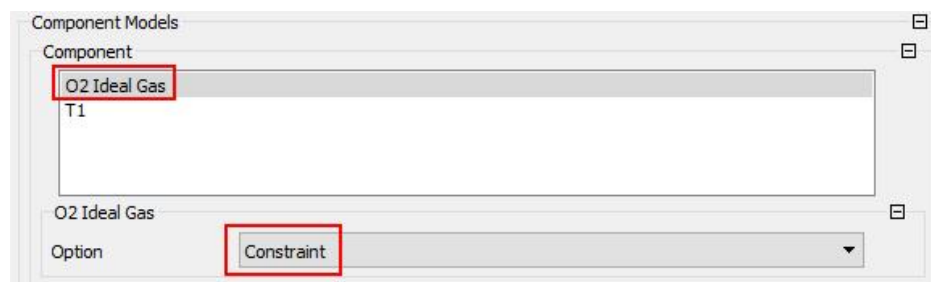


Рис. 4.19. Окислитель

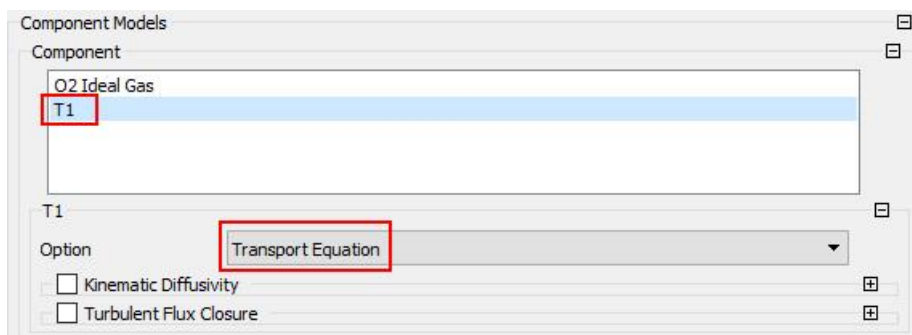


Рис. 4.20. Горючее

С целью определения условий течения компонентов в форсунке и расчетной области необходимо указать граничные условия на входах, выходе и стенках (по одному граничному условию на каждое отдельное наименование поверхностей).

Необходимо добавить граничные условия на входе окислителя, горючего, на выходе и на стенках. Для этого следует нажать правую кнопку мыши по вкладке «Default Domain» выбрать «Insert», «Boundary» (рис. 4.21). Называть условия по названию поверхностей (Named Selections).

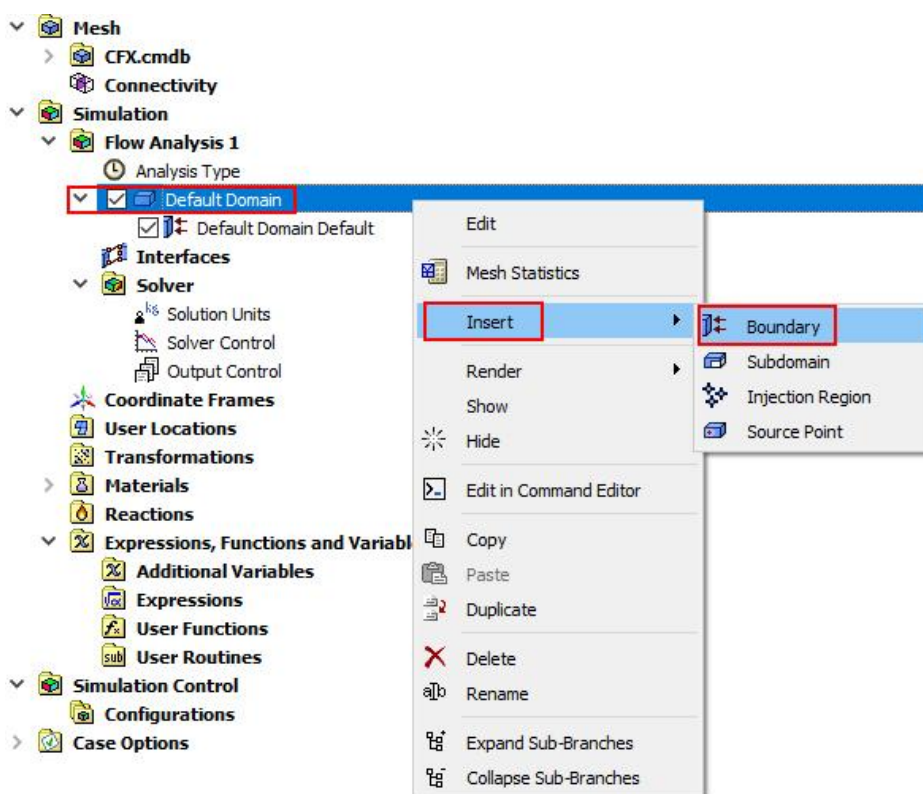


Рис. 4.21. Добавление граничного условия

На входе окислителя во вкладке «Boundary Details» в «Mass And Momentum» необходимо выбрать опцию «Mass Flow Rate», в «Heat Transfer» – «Static Temperature», в «Component Details» необходимо ввести массовую долю горючего равную 0 (рис. 4.22). Ввести массовый расход и температуру окислителя.

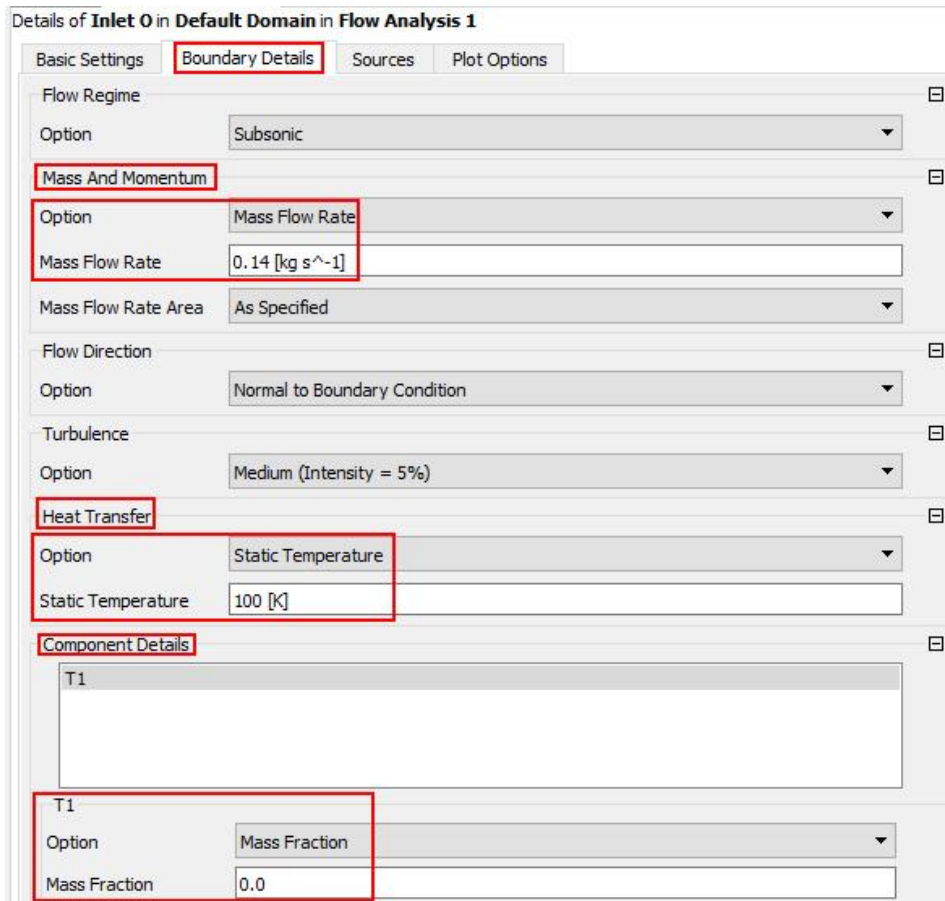


Рис. 4.22. Boundary Details на входе окислителя

На входе горючего во вкладке «Boundary Details» в «Mass And Momentum» необходимо выбрать опцию «Mass Flow Rate», в «Heat Transfer» – «Static Temperature», в «Component Details» необходимо ввести массовую долю горючего равную 1 (рис. 4.23). Ввести массовый расход и температуру горючего.

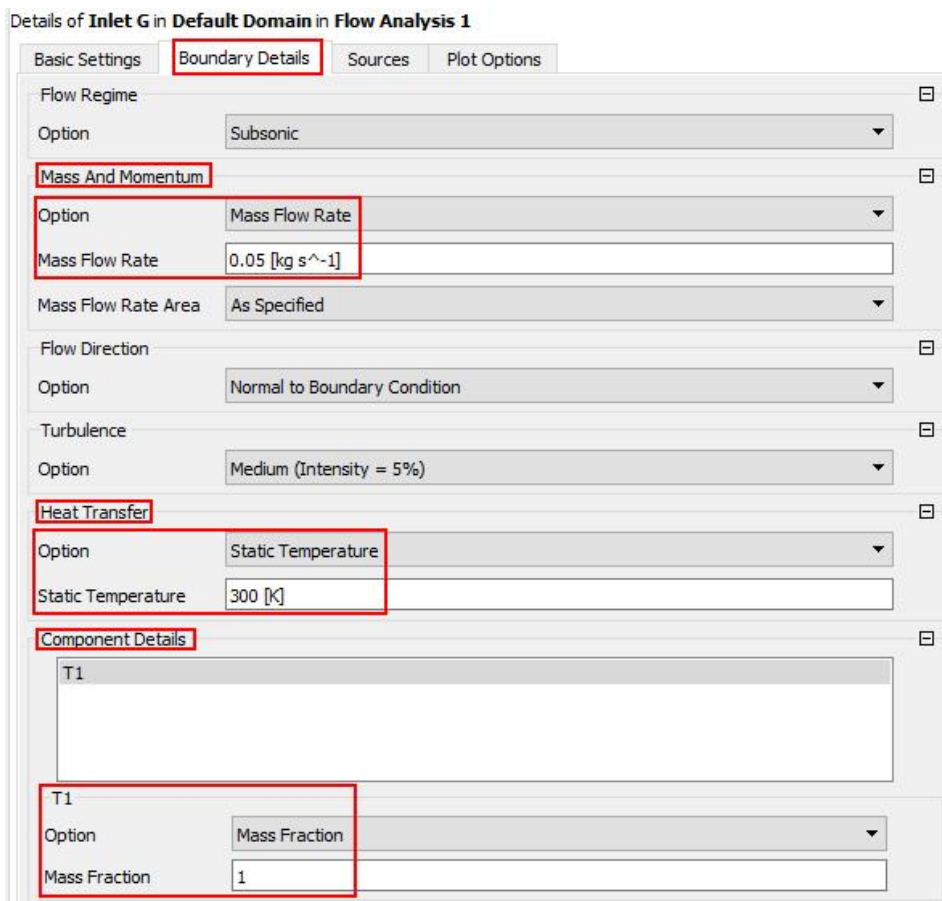


Рис. 4.23. Boundary Details на входе горючего

На выходе во вкладке «Boundary Details» в «Mass And Momentum» необходимо выбрать опцию «Average Static Pressure» и ввести давление на входе в камеру сгорания (рис. 4.24).

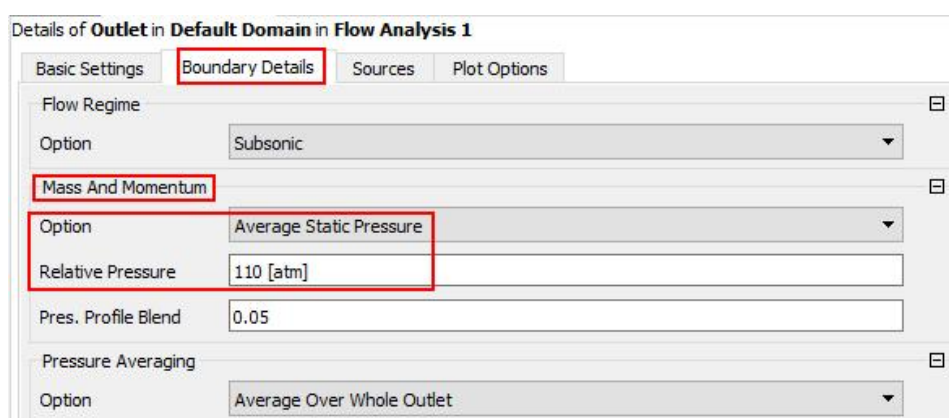


Рис. 4.24. Boundary Details на выходе

Необходимо добавить «User Points» (пользовательские точки) с целью отслеживания необходимых параметров в процессе расчета без его остановки.

В «Output Control» во вкладке «Monitor» необходимо ввести следующие выражения, соответствующие физическим характеристикам (рис. 4.25):

- Массовый расход на входе окислителя (Mass Flow Inlet O) – $\text{massFlow()}@REGION:Inlet O$;
- Массовый расход на входе горючего (Mass Flow Inlet G) – $\text{massFlow()}@REGION:Inlet G$;
- Массовый расход на выходе (Mass Flow Outlet) – $-\text{massFlow()}@REGION:Outlet$;
- Давление на входе окислителя (Static Pressure Inlet O) – $\text{areaAve(Pressure)}@REGION:Inlet O$;
- Давление на входе горючего (Static Pressure Inlet G) – $\text{areaAve(Pressure)}@REGION:Inlet G$;
- Давление на выходе (Static Pressure Outlet) – $\text{areaAve(Pressure)}@REGION:Outlet$.

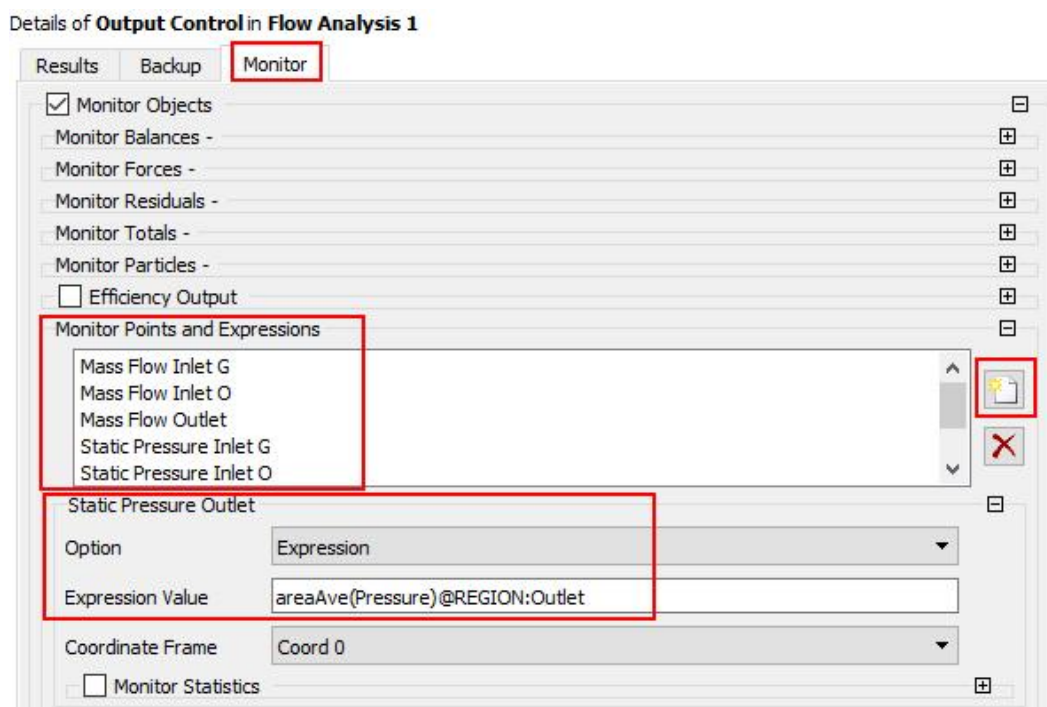


Рис. 4.25. Пользовательские точки

При запуске расчета в появившемся окне в «Parallel Environment» (рис. 4.26) необходимо выбрать «Run Mode» – «Intel MPI Local Parallel», в «Partitions» необходимо вписать количество ядер для расчета (обычно -1 или -2 от общего количества ядер на компьютере, чтобы оставить ресурсы для других процессов). Нажимаем «Start Run».

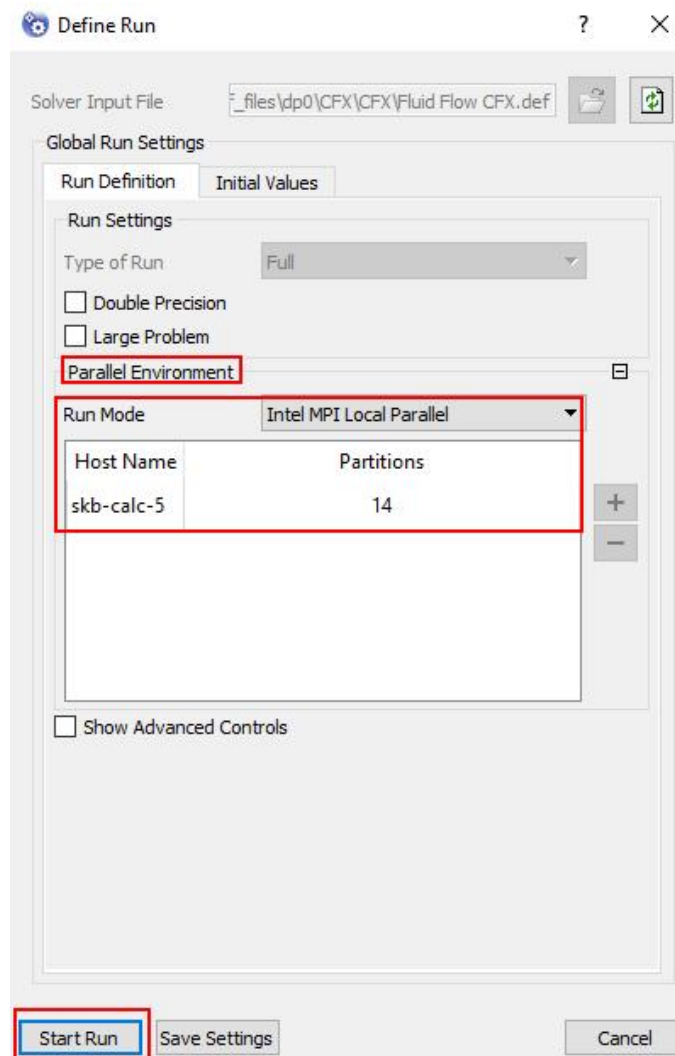


Рис. 4.26. Запуск расчета

В начале расчета необходимо настроить мониторы для отслеживания параметров. Для этого вверху во вкладке «Workspace» выбираем функцию «New Monitor». Необходимо сделать 2 монитора: массовый расход (Mass Flow) и давление (Static Pressure). В настройках монитора во вкладке «USER POINT» необходимо выбрать точки, соответствующие этому монитору (рис. 4.27).

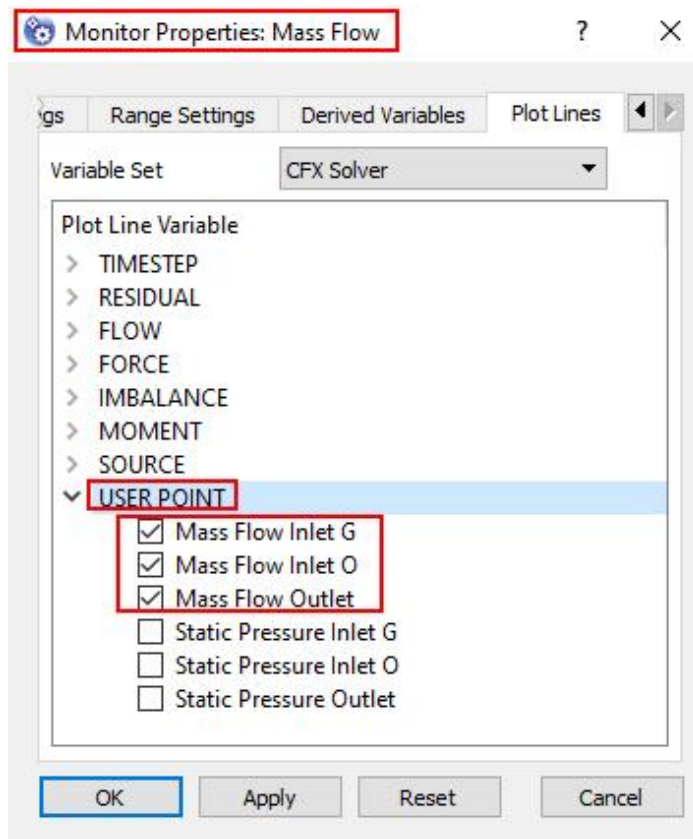


Рис. 4.27. Выбор пользовательских точек

Далее во вкладке «Workspace» необходимо выбрать функцию «Toggle Layout Type» и закрыть все окна кроме «Momentum and Mass», «Out File», «Mass Flow» и «Static Pressure», там же необходимо выбрать функцию «Arrange Workspace». Далее в настройках монитора «Momentum and Mass» (нажимаем правую кнопку мыши на мониторе и выбираем «Monitor Properties») во вкладке «Range Settings» необходимо отключить функцию «Set Manual Scale (Log)» (рис. 4.28).

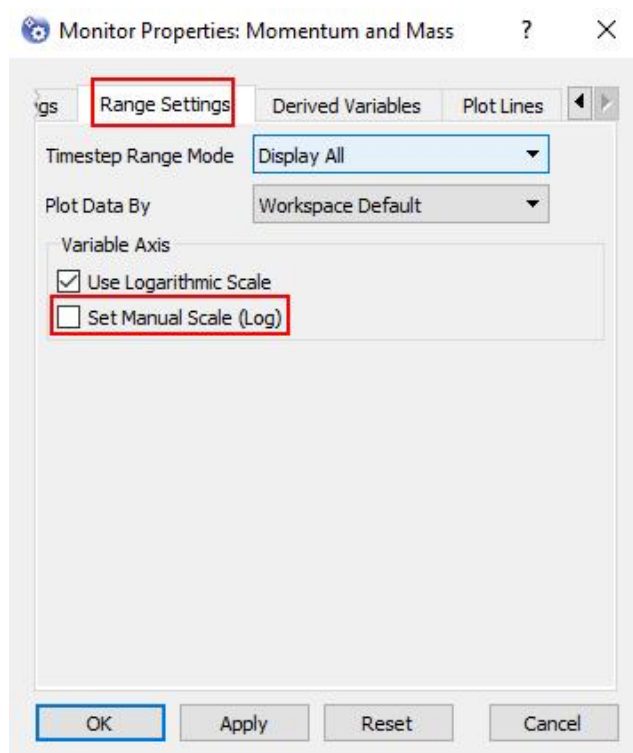


Рис. 4.28. Настройки монитора «Momentum and Mass»

Расчет считается завершенным, когда все ранее указанные графики выродились в почти горизонтальные линии или достигли периодических колебаний, а массовый расход на выходе равен сумме массовых расходов на входе окислителя и горючего (рис. 4.29).

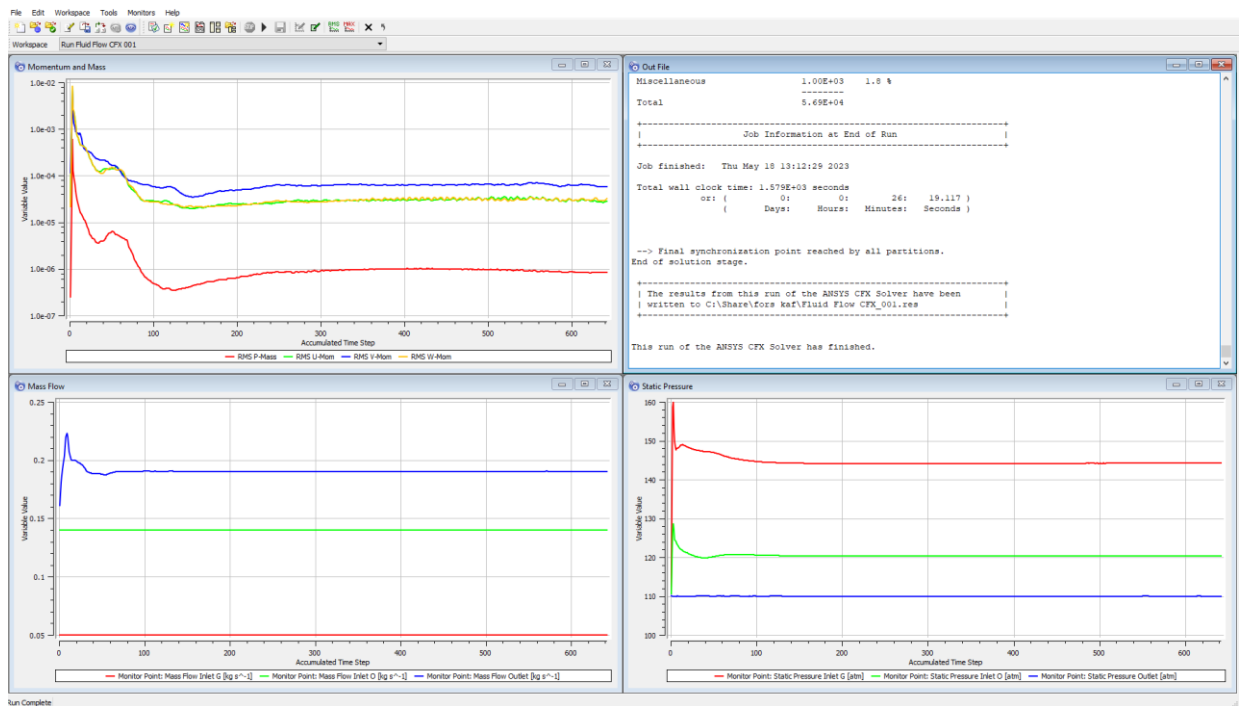


Рис. 4.29. Конец расчета

По результатам расчета для оценки работоспособности форсунки необходимо получить поля давления, скорости, температуры, массовые доли компонентов, действительное соотношение компонентов и линии тока во всей расчетной области модели. Для этого необходимо зайти в блок «results» и создать плоскость, выбрав на верхней панели пункт «Location», «Plane» (рис. 4.30).



Рис. 4.30. Создание плоскости

Во вкладке «Geometry» в «Definition» (рис. 4.31) необходимо выбрать метод построения плоскости (базовые плоскости, по точке и нормали и по трем точкам). Далее следует любым удобным методом построить плоскость, содержащую ось форсунки для просмотра полей требуемых величин в осевой плоскости вдоль всей расчетной области. Во вкладке «Color» необходимо выбрать «Mode» – «Variable», в «Variable» необходимо выбрать переменную, поле распределения которой будет отображаться, в «Range» необходимо выбрать «Local» (рис. 4.32).

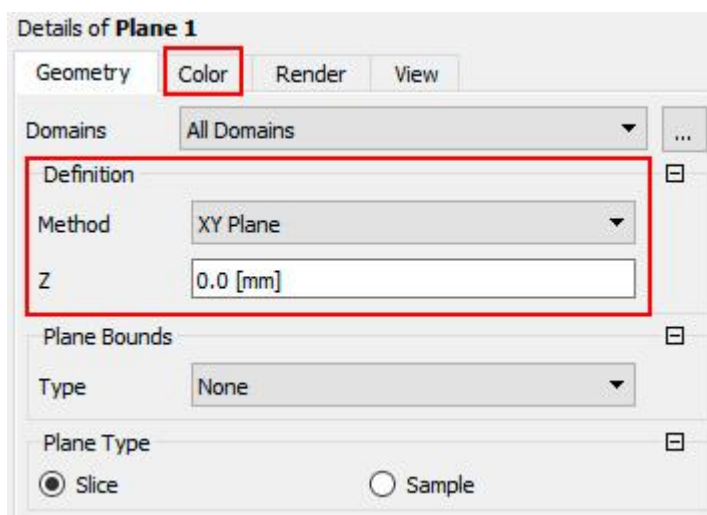


Рис. 4.31. Вкладка «Geometry» в настройках плоскости

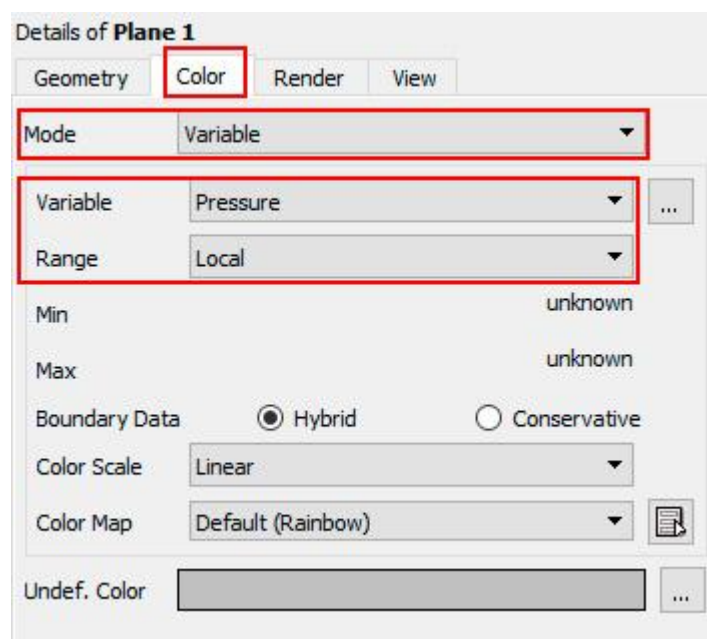


Рис. 4.32. Вкладка «Color» в настройках плоскости

В ANSYS отсутствует величина, соответствующая действительному соотношению компонентов, поэтому необходимо добавить вручную соответствующую переменную. Для этого во вкладке «Expressions» надо нажать правую кнопку мыши и нажать на «New» (рис. 4.33).

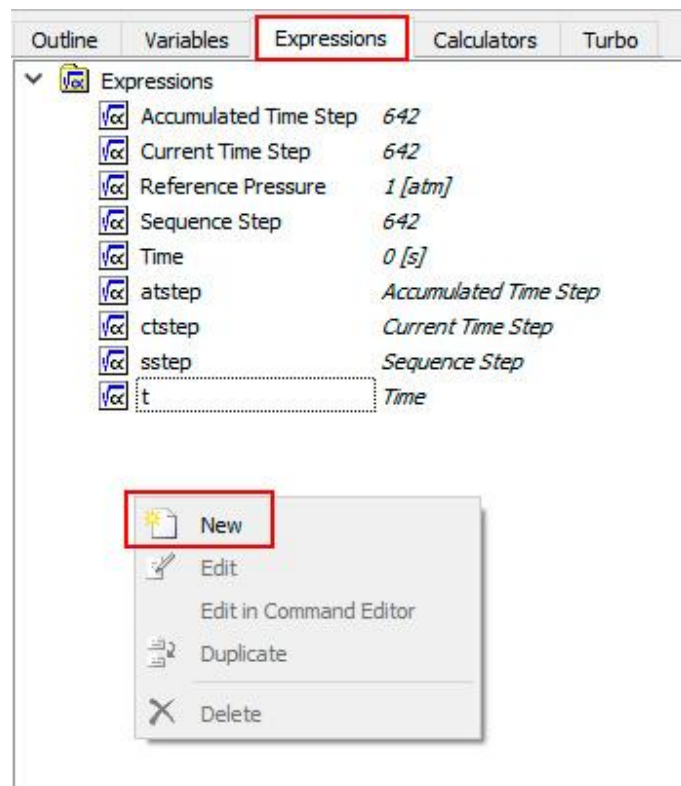


Рис. 4.33. Создание «Expression»

Действительное соотношение компонентов топлива равно отношению массовой доли окислителя к массовой доле горючего:

$$k_m = \frac{\mu_{ок}}{\mu_2},$$

где $\mu_{ок}$ – массовая доля окислителя, μ_2 – массовая доля горючего.

В появившемся окне необходимо вписать выражение для действительного соотношения компонентов. Для этого необходимо нажать правую кнопку мыши, выбрать «Variables» и выбрать необходимые переменные (рис. 4.34).

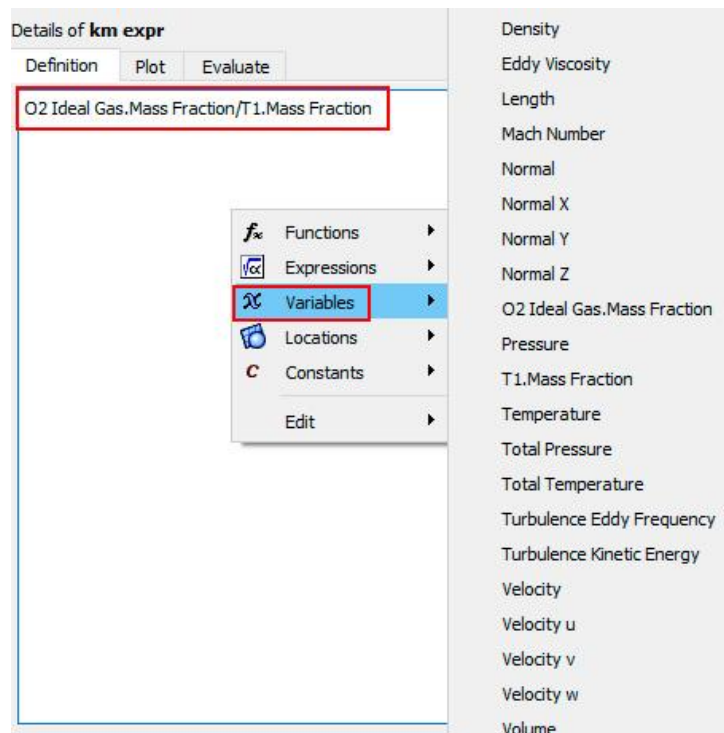


Рис. 4.34. Выражение для действительного соотношения компонентов

Далее во вкладке «Variables» надо нажать правую кнопку мыши и нажать на «New» (рис. 4.35). В появившемся окне выбираем метод «Expression» и выбираем выражение для действительного соотношения компонентов, показанное на рис. 4.34 (рис. 4.36).

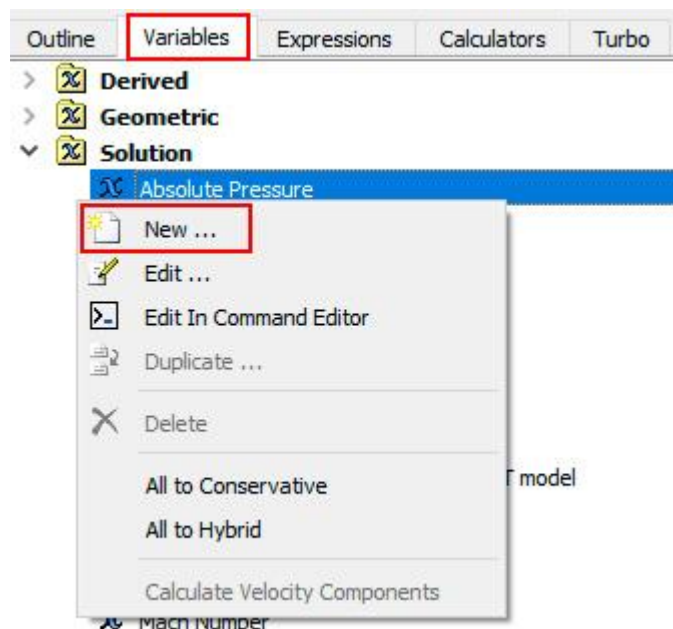


Рис. 4.35. Создание «Variable»

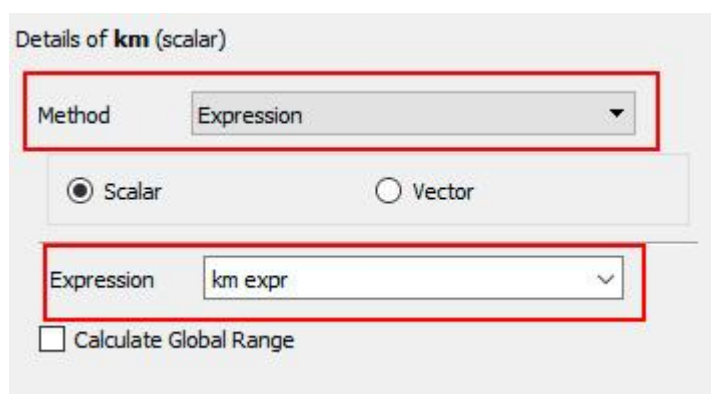


Рис. 4.36. Переменная для действительного соотношения компонентов

Чтобы построить линии тока необходимо на верхней панели выбрать вкладку «Insert» и выбрать функцию «Streamline» (рис. 4.37).

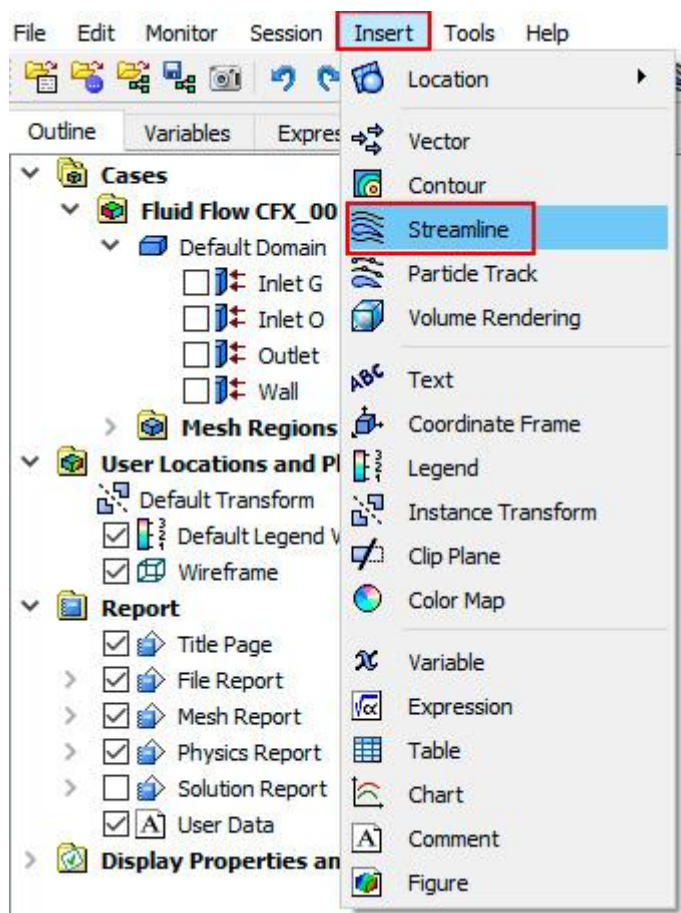


Рис. 4.37. Построение Streamline

В появившемся окне необходимо выбрать поверхности, от которых будут начинаться линии тока (вход окислителя и горючего), и количество точек (рис. 4.38).

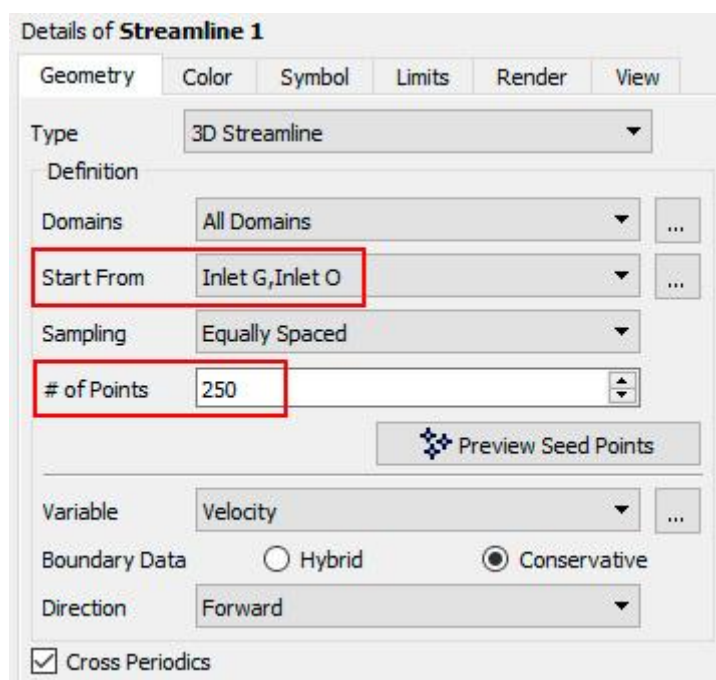


Рис. 4.38. Построение линий тока

Таким образом, численное моделирование является эффективным инструментом для проверки значений, полученных аналитическим путем. Такой подход способствует повышению точности и надежности расчетов, а также оптимизации процесса смесеобразования в смесительном элементе ЖРД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Егорычев, В. С.** Расчёт и проектирование смесеобразования в камере ЖРД: [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В.С. Егорычев; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текст и граф. дан. (3,25 Мбайт). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Расчет и проектирование системы смесеобразования	4
2 Определение массовых расходов	6
3 Гидрогазодинамический расчет и проектирование двухкомпонентных топливных форсунок.....	7
4 Проведение численного моделирования процесса смесеобразования в смесительном элементе ЖРД.....	14
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	37

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ЖИДКОСТНЫХ
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине
«Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» для студентов
специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»
очной формы обучения
Часть 2

Составители:

Шматов Дмитрий Павлович

Башарина Татьяна Александровна

Акользин Иван Васильевич

Левина Анастасия Витальевна

Отпечатано в авторской редакции

Подписано к изданию 2023

Объем данных

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14