

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

В.С. Егорычев, Л.С. Шаблий, И.В. Кудинов

Численное моделирование двухфазных поток в форсунке камеры ЖРД

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение
эффективности научно-инновационной деятельности»
и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры»
Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы
по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения
для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)»
Соглашение № 2/11 от 03 июня 2013 г.

САМАРА

2013

УДК СГАУ: 621.438.001.2

Ч-67

Авторы: **Егорычев Виталий Сергеевич,**
Шаблий Леонид Сергеевич,
Кудинов Илья Владимирович.

Рецензент: зав. кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, д-р техн. наук, проф. **С.В. Фалалеев.**

Егорычев, В.С. Численное моделирование двухфазных потоков в форсунке камеры ЖРД [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В.С. Егорычев, Л.С. Шаблий, И.В. Кудинов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,2 Мбайт). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов двухкомпонентных форсунок жидкостных ракетных двигателей: построение геометрической модели, наложение расчётной сетки, создание расчётной модели, её решение и анализ результатов. Приведены методические рекомендации к решению задач моделирования форсунок различных типов: струйно-струйной, струйно-центробежной, центробежно-центробежной, как с внешним смещением компонентов, так и с внутренним.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302.65 «Ракетные двигатели» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Моделирование рабочих процессов РД» в 6 семестре, для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Моделирование процессов в камере сгорания» в 8 семестре, для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Исследование рабочего процесса ракетных двигателей и энергетических установок» в А-семестре.

Подготовлено на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

Введение.....	4
1 Исходные данные	9
2 Создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части форсунки	11
3 Наложение расчётной сетки на модель проточной части форсунки	20
4 Создание расчётной модели форсунки.....	27
5 Поиск решения.....	37
6 Анализ результатов	41
7 Погрешности при CFD-моделировании	53
8 Особенности моделирования форсунок различных типов.....	60
Библиографический список	68

Введение

Разработка нового ЖРД проводится следующими этапами:

- техническое предложение (ТП),
- эскизное проектирование (ЭП),
- рабочее проектирование (РП).

Эскизное проектирование ЖРД начинается с выбора системы подачи топлива, схемы и основных параметров двигателя. Затем выполняются термодинамический расчёт и проектирование камеры ЖРД, определяются параметры системы подачи топлива.

Камера является основным устройством (элементом) ЖРД, т.к. её функция совпадает с функцией ракетного двигателя. Камера состоит из камеры сгорания со смесительной головкой и сверхзвукового сопла.

Рабочий процесс в камере сгорания проектируемого ЖРД должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить:

- максимальную полноту сгорания топлива;
- устойчивость протекания процессов в камере для надежной и безопасной работы двигателя;
- защиту стенок камеры от перегрева и прогорания.

В самом общем случае рабочий процесс в камере сгорания представляет собой совокупность сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов преобразования топлива в конечные продукты сгорания, а именно:

1. подача (впрыск) топлива;
2. распыление и дробление компонентов;
3. первоначальное смешение;
4. распределение компонентов в объёме КС;
5. прогрев и испарение капель за счёт теплоты из зоны горения;
6. смешение газообразных горючего и окислителя;
7. горение, т.е. протекание экзотермических химических реакций как гомогенных, так и гетерогенных;
8. турбулентное и диффузное перемешивание продуктов сгорания;
9. выравнивание состава продуктов сгорания перед входом в сопло.

Реальная картина рабочего процесса в камере сгорания зависит:

- ✓ от природы топлива,
- ✓ схемы организации рабочего процесса,
- ✓ конструкции КС,
- ✓ системы смесеобразования.

Эффективность работы камеры сгорания ЖРД, прежде всего, зависит от качества протекания процессов смесеобразования и горения.

Смесеобразованием называется комплекс процессов, протекающих от момента подвода к камере компонентов топлива до образования в КС однородной гомогенной топливной смеси с требуемым соотношением компонентов.

Система смесеобразования осуществляет ввод, распыление, смешение и первоначальное распределение компонентов топлива или продуктов газогенерации в камере сгорания. Она должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить высокую полноту сгорания топлива в камере сгорания, минимальные потери энергии в камере, надёжную защиту стенок камеры от прогара и устойчивое протекание рабочего процесса [1].

Степень отличия действительного (реального) процесса в камере сгорания от идеального оценивается коэффициентом камеры сгорания φ_k . Коэффициент камеры сгорания является критерием эффективности рабочего процесса в камере сгорания. Он может служить целевой функцией при оптимизации системы смесеобразования, параметров смесительной головки и форсунок в первом приближении при эскизном проектировании ЖРД.

Обычно требуется спроектировать систему смесеобразования камеры ЖРД, обеспечивающую заданную (требуемую) величину коэффициента камеры сгорания φ_k .

При расчёте и проектировании системы смесеобразования камеры ЖРД целесообразно придерживаться следующего общего порядка [2, 3].

1. Обоснованно выбрать форму и тип смесительной головки камеры, предварительно наметить её конструктивную схему.
2. Выбрать тип форсунок и схему расположения их на днище смесительной головки камеры.

3. Определив наружный диаметр форсунок и шаг между ними, изобразить с помощью графического редактора схему расположения форсунок на огневом днище смесительной головки камеры требуемого диаметра. Можно вычертить половину, одну треть или одну шестую часть днища, если имеет место соответствующая симметрия расположения форсунок на нём.

4. Определив количество форсунок горючего $n_{г}$, окислителя $n_{ок}$ или генераторного газа $n_{гг}$ или же двухкомпонентных форсунок в ядре потока $n_{я}$ и пристеночном слое $n_{пр}$, если организация такового предусмотрена, вычислить массовые расходы компонентов топлива через одну ядерную форсунку окислителя $\dot{m}_{ф.ок.я}$, горючего $\dot{m}_{ф.г.я}$ или генераторного газа $\dot{m}_{ф.гг.я}$, одну пристеночную форсунку окислителя $\dot{m}_{ф.ок.пр}$, горючего $\dot{m}_{ф.г.пр}$ или генераторного газа $\dot{m}_{ф.гг.пр}$, через одну двухкомпонентную ядерную и пристеночную форсунки, зная общий расход компонентов или генераторного газа через камеру.

Если тип головки не предусматривает установку ядерных и пристеночных форсунок, то определяются расходы компонентов топлива через форсунку окислителя, форсунку горючего или двухкомпонентную форсунку.

5. Провести проектный гидрогазодинамический расчёт выбранного типа форсунок, обоснованно принимая ряд проектных решений. Проектируемая форсунка должна обеспечить требуемый массовый расход компонентов топлива $\dot{m}_{ф}$ при установленном Вами ранее в проектном термодинамическом расчёте камеры ЖРД перепаде давления на форсунке $\Delta p_{ф}$.

Если он окажется меньше или больше требуемого и даже выходит за рекомендуемый обычно диапазон перепада давления на форсунке $\Delta p_{ф}$, то необходимо соответственно изменить проходные сечения ядерных форсунок. В том случае, когда это окажется невозможным при условии невыхода за пределы рекомендованных норм, то необходимо изменить либо тип форсунок, либо схему их расположения на головке, либо наружный диаметр и количество форсунок, либо всё вместе.

6. 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.

7. Используя принятые проектные решения и результаты проектных расчётов, построить электронную 3D-модель, а по ней получить поперечные и продольные разрезы ядерной и пристеночной двухкомпонентных форсунок или же ядерных и пристеночных однокомпонентных форсунок окислителя и горючего или генераторного газа, ориентируясь на существующие и выбранные схемы и прототипы.

Результаты эскизного проектирования камеры и её смесеобразования используются в качестве исходных данных при рабочем проектировании ЖРД в целом, его отдельных систем, агрегатов и узлов. Рабочее проектирование может потребовать корректировки результатов эскизного проектирования. Тогда вносятся необходимые изменения в значения отдельных параметров и расчёт уточняется.

В настоящем учебном пособии предпринята попытка моделирования рабочего процесса смесительной головки и форсунок в ANSYS CFD и выработки основных положений методики такого моделирования.

Применение компьютерных технологий при разработке системы смесеобразования ЖРД и её элементов позволяет не только автоматизировать процесс разработки, но и повысить качество проектируемых изделий, существенно сократить сроки их создания и привести к снижению затрат на весь жизненный цикл.

Насколько тщательно будут выполнены все проектные работы по смесительной головке и форсункам, правильно построена методика проведения машинного эксперимента в значительной степени зависят надёжность двигателя, возможность сокращения сроков каждого из этапов работ и в конечном счете сроки создания и стоимость двигателя.

Одним из перспективных компьютерных средств исследования рабочего процесса камеры ЖРД, в частности гидродинамики смесительной головки и её форсунок, является использование CFD-

пакета ANSYS CFX – пакета вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD).

Ранее в учебной литературе [4-6] было рассмотрено CFD-моделирование рабочих процессов автономных и предкамерных осевых турбин, а также шнекоцентробежных насосов «обычных» (с постоянной плотностью при изменении давления) компонентов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX.

В настоящем учебном пособии приведены рекомендации по практическому освоению CFD-пакета ANSYS CFX на примере моделирования потока компонентов топлива и генераторного газа в смесительной головке и форсунках ЖРД.

Процесс моделирования потока компонентов в форсунке состоит из пяти основных этапов: создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части насоса; создание сеточной модели проточной части насоса на базе геометрической модели; создание расчётной модели из сеточной путём наложения условий моделирования исследуемых процессов; поиск решения и анализ результатов моделирования.

Каждый этап в настоящем учебном пособии описан подробно.

1 Исходные данные

Для моделирования течения компонентов топлива в форсунке необходимы исходные данные, полностью отражающие геометрическую форму проточной части, а также характеристики потоков на входе в исследуемую область.

В данном учебном пособии будет рассмотрено моделирование рабочего процесса струйно-центробежной газо-жидкостной форсунки, аналогичной тем, которые получают студентами самостоятельно, в ходе курсового проектирования по методике, представленной в [3].

На рисунке 1.1 представлена схема и геометрические параметры исследуемой форсунки.

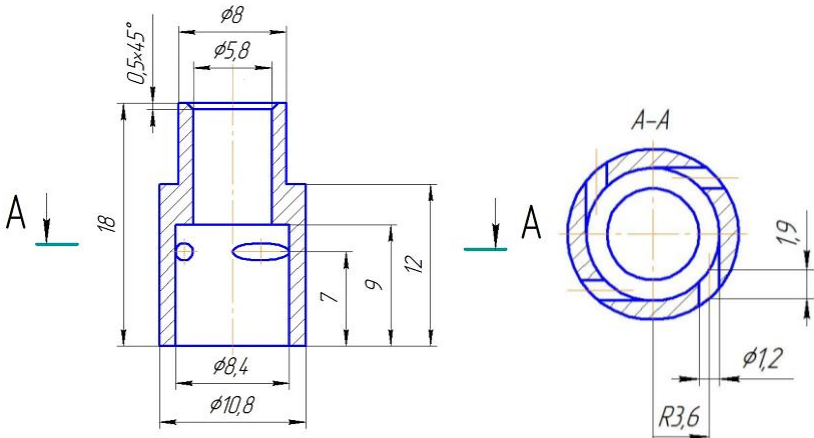


Рисунок 1.1 - Схема проточной части форсунки

В струйно-центробежной форсунке через внутренний контур втекает генераторный газ, состоящий преимущественно из газообразного кислорода. Через тангенциальные отверстия втекает жидкий керосин. Внутри форсунки происходит предварительное смешение данных компонентов. Затем оба компонента истекают в камеру сгорания.

Основные параметры работы форсунки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры работы форсунки

№	Наименование	Обозначение	Значение	Размерность
1	Расход окислителя	$\dot{m}_{ок}$	279,7	г/с
2	Расход горючего	$\dot{m}_г$	274,0	г/с
3	Давление на входе окислителя	$p_{вх\ ок}$	18,09	МПа
4	Давление на входе горючего	$p_{вх\ г}$	18,09	МПа
5	Давление на выходе из форсунки	$p_к$	17,09	МПа
6	Средний угол факела распыла	$\bar{\alpha}$	55,8	градусы

Основные параметры компонентов форсунки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры компонентов топлива

Параметр	Компонент		
	Окислитель	Горючее	Продукты сгорания
Состав	Кислород	Керосин	Вода и CO ₂
Химическая формула	O ₂	C ₁₀ H ₂₂	H ₂ O и CO ₂ (1:1)
Фазовое состояние	Газ	Жидкость	Газ
Молярная масса, г/моль	32	142	30
Температура, К	738	390	2600
Плотность *, кг/м ³	94,2	780	23,8
Динамическая вязкость, Па · с	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент поверхностного натяжения в воздухе **, Н/м	-	0,029	-

* Несмотря на то, что плотность газов при изменяющемся давлении не является постоянной величиной, на первом этапе расчёта она принимается постоянной.

** Для корректного расчёта необходимо знать коэффициент поверхностного натяжения для всех жидкостей не в воздухе, а в среде каждого газового компонента.

Далее приведено пошаговое описание процесса формирования расчётной модели с данными условиями.

2 Создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части форсунки

Течение во внутренних каналах форсунки сильно зависит от того, как поток вошёл в форсунку, поэтому необходимо моделировать течение не только в полости форсунки, но также в области ниже и выше по потоку. Для моделирования потока, заходящего в форсунку и выходящего из неё, необходимо выделить область течения, находящуюся в «области интересов», т.е. параметры в этой области интересны как с точки зрения их оценки, так и с точки зрения того, что они могут оказывать влияние на потоки внутри форсунки. Естественными ограничителями являются непроницаемые стенки форсунки, огневого и среднего днища. Там, где поток неограничен, необходимо задаться условными входными и выходными границами, таким образом сформировав замкнутую расчётную зону (рисунок 2.1).

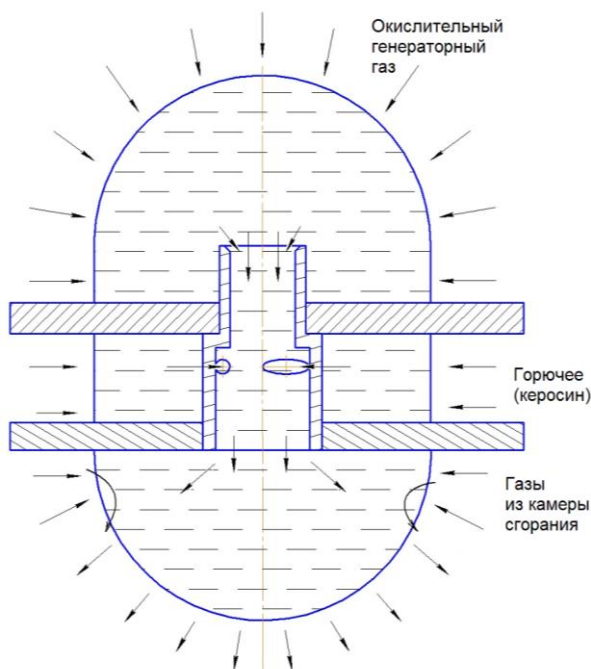


Рисунок 2.1 – Расчётная зона форсунки

В идеальном случае эти границы должны находиться на таком удалении от «области интересов», на которое не распространяются изменения полей течения, вызванные процессами в исследуемом объекте. Например, поворот и разгон потока при входе в канал форсунки распространяет вверх по потоку область пониженного давления и неравномерность поля скоростей. Соответственно, очень важно, чтобы входная граница находилась от этого места настолько далеко, чтобы значимые возмущения не доходили до неё. Как правило, для большинства различных течений это расстояние составляет 10 калибров. Близко стоящие форсунки смесительной головки могут влиять друг на друга, соответственно, желательно моделировать процесс одновременно в нескольких форсунках. Однако это усложнение модели и в данной пособии будет рассматриваться только моделирование одной форсунки без учёта влияния соседних.

Создание геометрической модели форсунки выполняется в системе CAD-моделирования ANSYS DesignModeller, встроенной в систему ANSYS Workbench.

Шаг 1. Запустить ANSYS Workbench из меню программ:

Пуск -> Программы -> ANSYS 14.5 -> Workbench

Шаг 2. Добавить в пустой проект Workbench систему построения геометрии Geometry из раскрывающегося подменю *Component Systems*, вытянув её на белое поле проекта из левого списка (рисунок 2.2).

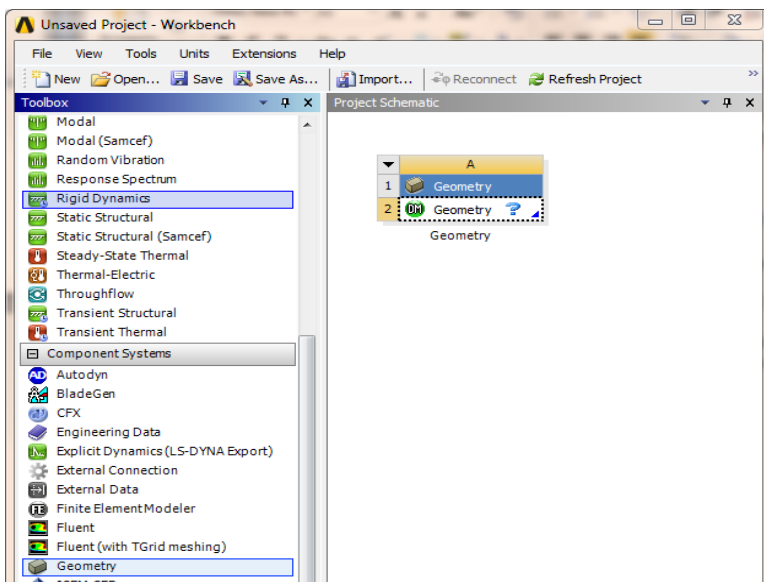


Рисунок 2.2 – Окно ANSYS Workbench при запуске и элемент системы построения геометрии Geometry

Шаг 3. Используя инструменты эскизирования Design Modeler (Sketching) необходимо сформировать эскиз половины расчётной зоны, построив два замкнутых контура (рисунок 2.3). Крайне желательно, чтобы при построении осью форсунки была принята ось Z. Дело в том, что именно координатная ось Z принята по умолчанию за ось поворота при формировании периодических граничных условий. Кроме того, желательно, чтобы истечение происходило в положительном направлении оси Z, это упростит анализ, избавив расчёт от отрицательных значений компонентов скорости. Таким образом, для построения можно выбрать плоскость YZ. Для удобства выход из сопла форсунки нужно располагать в начале координат.

При эскизировании сначала выполняется построение замкнутой кривой по произвольным размерам, а затем, с помощью вкладки Dimensions производится «образмеривание» в соответствии с чертежом (см. рисунок 1.1). Когда образмериваемый элемент эскиза теряет все степени свободы, он меняет цвет с бирюзового на синий. В результате правильной постановки размеров эскиз должен полностью стать синим.

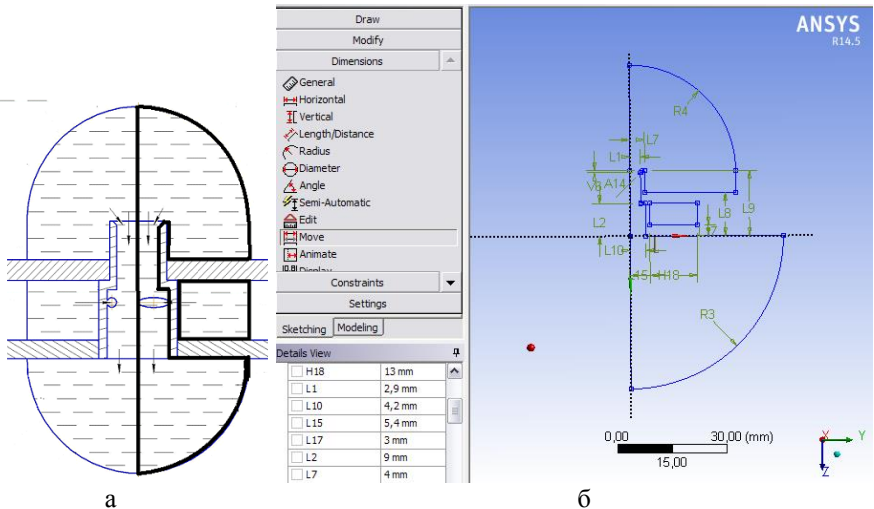


Рисунок 2.3 – Формирование эскиза проточной части:

а - схема эскиза проточной части, б - формирование эскиза в Design Modeler

Шаг 4. Выполняя операцию Revolve, «провернуть» эскиз вокруг оси форсунки и тем самым сформировать секторную модель, которая будет содержать два непересекающихся тела, соответствующих замкнутым контурам эскиза (рисунок 2.4).

В рассматриваемом случае должна быть смоделирована 1/4 часть проточной части форсунки, т.е. поворот будет осуществляться на 90 градусов. При формировании неполной модели следует выделять часть течения так, чтобы поверхности разделения не касались краёв отверстий, непарных границ форсунки и т.п., иначе в паре периодических границ может возникнуть несоответствие (рисунок 2.5).

Чтобы учесть эти особенности, нужно выполнить поворот на 90 градусов в виде двух поворотов эскиза (Both - Asymmetric): на 70 и 20 градусов в обе стороны от плоскости эскиза (см. рисунок 2.4, а).

Замечание! При формировании полуокружной (180-градусной) модели, для того, чтобы две боковые поверхности не объединялись в одну, необходимо задавать угол поворота, немного отличающийся от 180-ти (179,99 или 180,01).

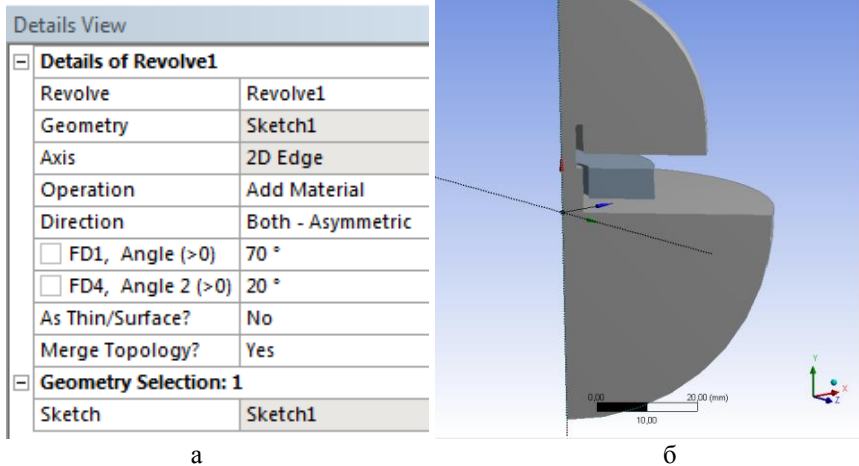


Рисунок 2.4 – Формирование секторной модели проточной части операцией Revolve: а - параметры операции, б - результат выполнения

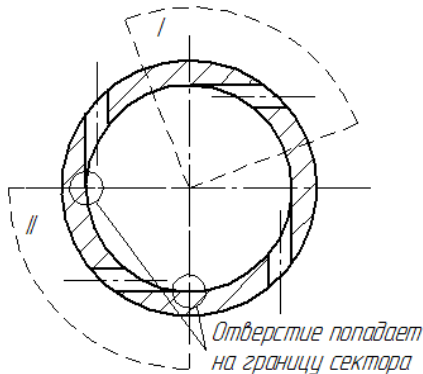


Рисунок 2.5 – Схема выделения секторной модели форсунки: I-правильно, II - неправильно (на границы попадают тангенциальные отверстия)

Шаг 5. Для соединения полученных на предыдущем шаге полостей, необходимо создать из «примитивов» цилиндрическое тело, представляющее собой полость тангенциального отверстия в стенке форсунки (см. рисунок 2.1). В 90-градусной секторной модели нужно создать только одно отверстие. Положение и размеры цилиндра задаются в соответствии с чертежом (рисунок 2.6).

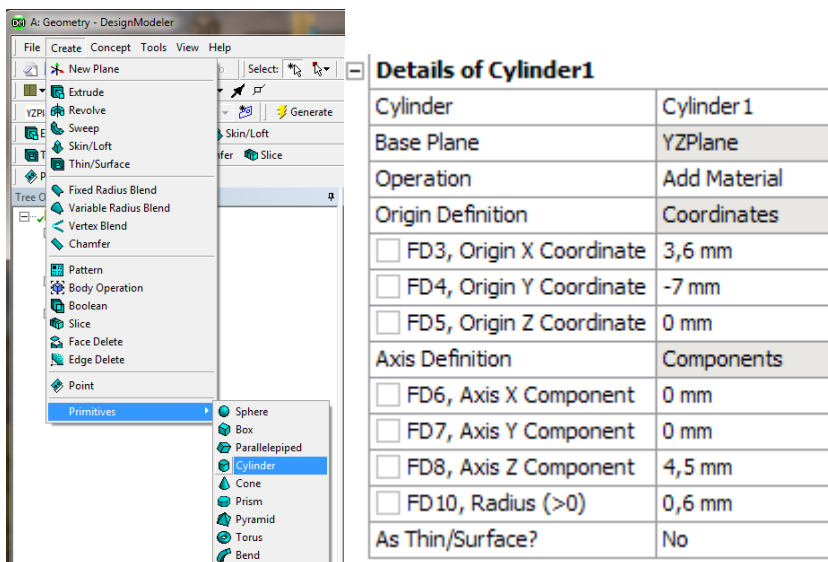


Рисунок 2.6 - Параметры операции по созданию цилиндрической полости тангенциального отверстия

Созданное цилиндрическое тело, по умолчанию обладая признаком операции Add Material (добавлять вещество), автоматически объединит обе полости модели в одно тело (рисунок 2.7).

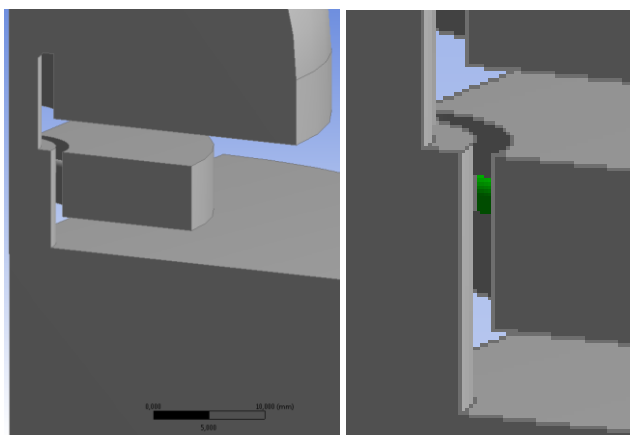


Рисунок 2.7 – Тангенциальный цилиндрический канал

После выполнения всех операций в списке тел должно быть только одно твёрдое тело (1 Part, 1 Body). Иногда просмотреть внутренние части сложного тела бывает невозможно из-за того, что их закрывают внешние поверхности. В этом случае часть поверхностей можно «погасить»: выделить левой кнопкой мыши, затем правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню (рисунок 2.8) и выбрать пункт *Hide Face(s)* (Не путать с *Hide Body*, который «погасит» всё тело целиком!).

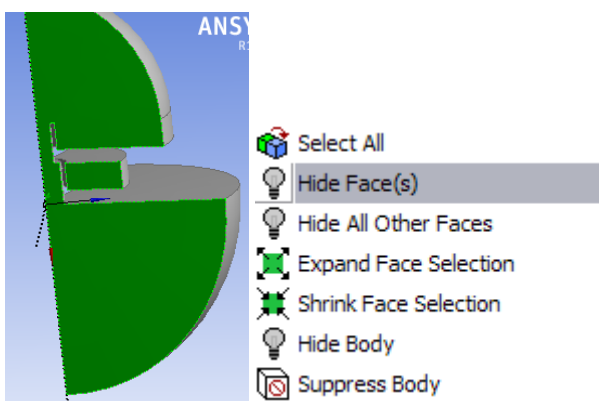


Рисунок 2.8 – Операция отключения отображения части поверхностей

После этого можно будет проконтролировать не только внешние поверхности модели, но её внутренние каналы (рисунок 2.9). Обратное «включить» отображение погашенных поверхностей можно командой контекстного меню *Show All Faces*.

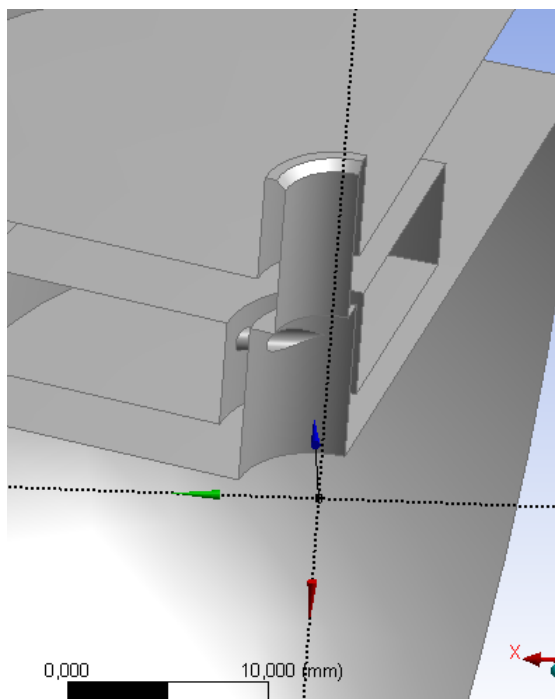


Рисунок 2.9 – 90-градусная модель проточной части форсунки

Шаг 6. Задать свойства построенной геометрической модели.

По умолчанию построенная геометрия является моделью твёрдого тела (*Solid*), лучше сразу поставить ей признак «область течения» (*Fluid*). Для этого нужно выбрать построенную геометрию в меню *Tree Outline* (рисунок 2.10) и в поле *Fluid/Solid* из раскрывающегося списка выбрать *Fluid*.

Также можно изменить название зоны (*Body*) с начального *Solid* на более информативное название, например *Fluid_through_the_Nozzle* или аналогичное.

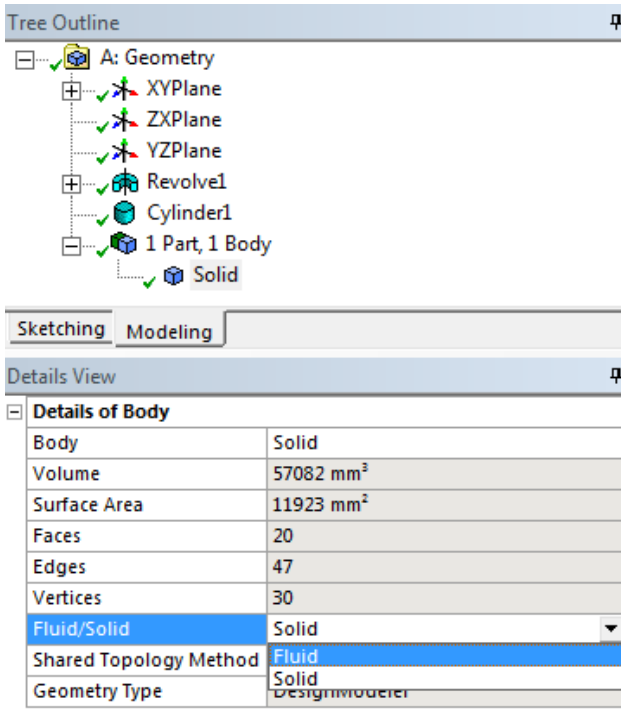


Рисунок 2.10 – Выбор признака Fluid/Solid расчётной области

На этом работу по созданию геометрической модели можно считать завершенной. Следует закрыть Design Modeler и сохранить проект Workbench. При сохранении нежелательно указывать в имени файла или пути к нему кириллические символы.

3 Наложение расчётной сетки на модель проточной части форсунки

Для формирования сетки на базе созданной геометрической модели проточной части форсунки необходимо выполнить следующие действия.

Шаг 1. Добавить в проект Workbench систему сеткогенерации Mesh (рисунок 3.1). Подсоединить в ней построенную в предыдущем разделе геометрию. Запустить сеткогенератор ANSYS Meshing двойным кликом на компоненте Mesh. При этом произойдёт автоматический импорт геометрии.

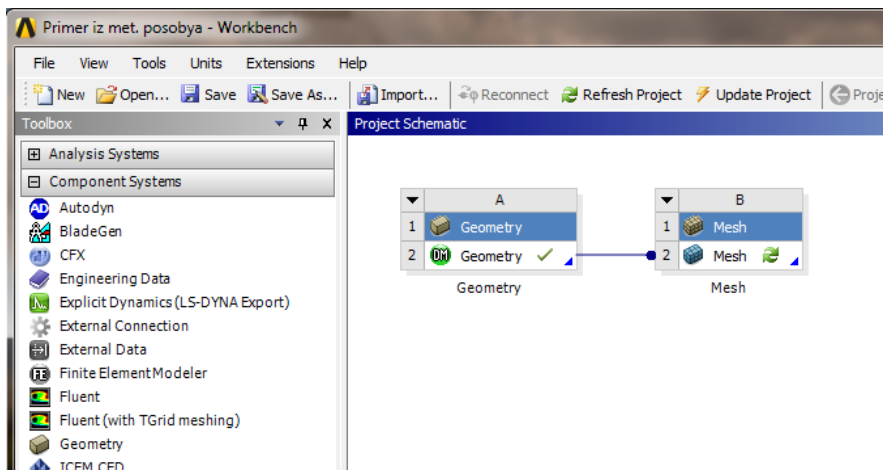
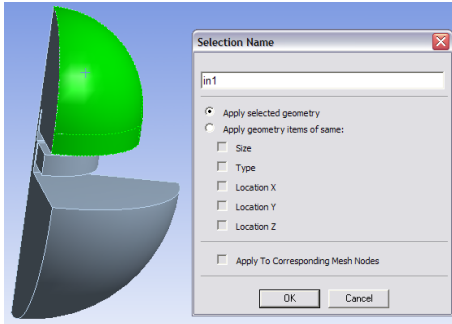


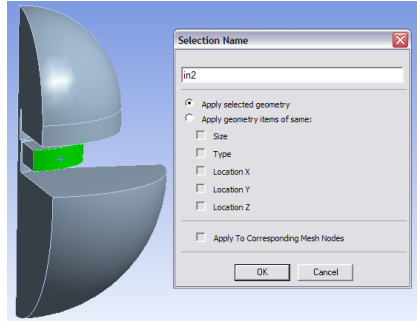
Рисунок 3.1 – Окно ANSYS Workbench с компонентом сетки *Mesh*

Шаг 2. Произвести наименование границ расчётной зоны, назвав входные зоны (in1, in2), выходную (out) и пару границ периодического условия (perA, perB) в соответствии с рисунком 3.2. Наименование границ производится через элемент контекстного меню *Create Named Selection*. Выделение нескольких поверхностей одновременно производится с нажатой клавишей Ctrl.

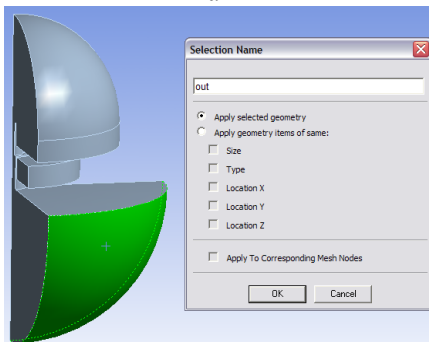
В результате среди неназванных границ должны остаться только поверхности, соответствующие непроницаемым стенкам (см. рисунок 3.2, e).



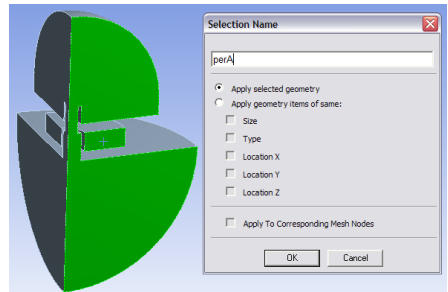
а



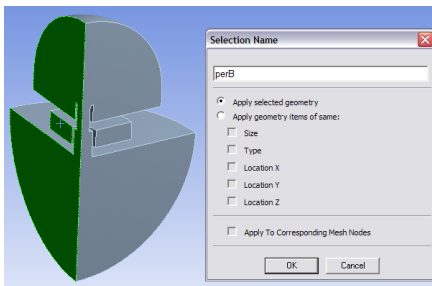
б



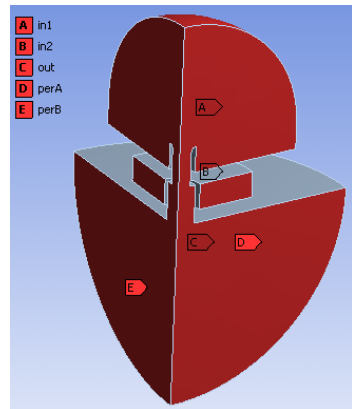
в



г



д



е

Рисунок 3.2 – Наименование границ:

а - вход in1, б - вход in2, в - выход out, г - первая половина периодической границы perA, д - вторая половина периодической границы perB, е - полный список всех границ

Шаг 3. Задать параметры построения сетки, воспользовавшись пунктом *Mesh* дерева проекта. Задать физику и тип решателя, для которого формируется сетка:

Physics Preference -> CFD;

Solver Preference -> CFX.

Присвоить параметру Relevance Center значение Fine, а также задать дополнительную размерную функцию, уменьшающую размерность элементов сетки в зависимости от кривизны (Curvature) геометрических элементов и их линейных размеров (Proximity):

Relevance Center -> Fine;

Use Advanced Size Function -> On: Proximity and Curvature.

Максимальный размер стороны элемента (Max Face Size) по умолчанию как правило оказывается слишком большим. Его можно задать как 1/5 от диаметра сопла форсунки (в рассматриваемом случае $8,4/5=1,7$ мм):

Max Face Size -> 1,7 mm (0,0017 m).

Для более подробного разрешения пограничного слоя потока вдоль непроницаемых стенок, рекомендуется накладывать на призматические слои сетки. В Meshing это реализуется опцией *Inflation* (надувание). В данном случае нужно использовать опцию *Program Controlled*, которая включает наложение призматических слоёв на всех граничных поверхностях, кроме тех, которые были названы с использованием опции *Named Selection*:

Use Automatic Inflation -> Program Controlled.

Следует помнить, что иногда автоматический алгоритм надувания призматических слоёв не справляется с обработкой сложных геометрических фигур. В этом случае от него придётся отказаться и реализовывать загущение пристеночных зон с помощью инструментов локального образмеривания (*Local Sizing*).

Остальные параметры можно оставить по умолчанию, и выполнить построение сетки, нажав *Generate Mesh* или *Mesh -> Update* (рисунок 3.3).

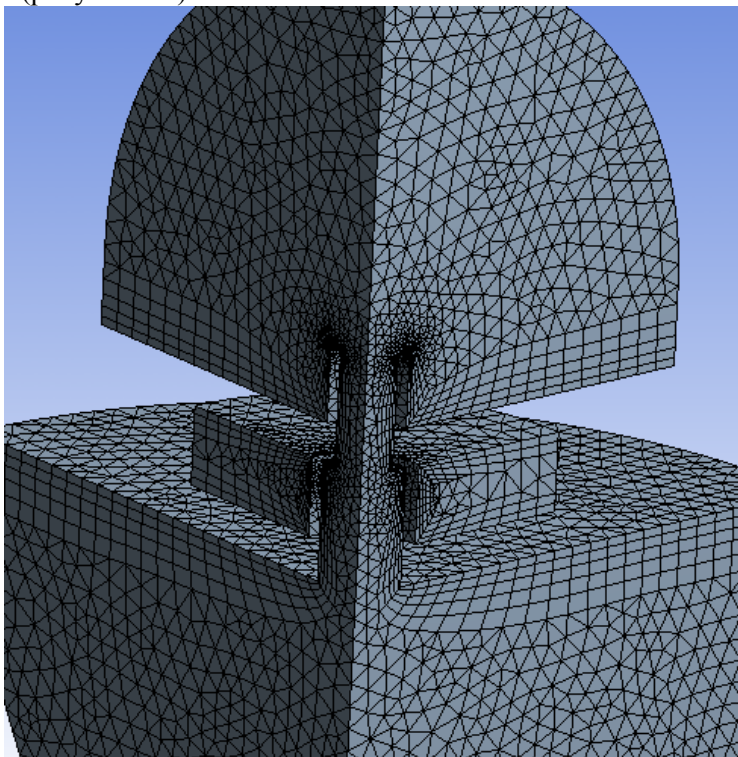


Рисунок 3.3 – Сеточная модель с пристеночными призматическими слоями

Шаг 4. Далее нужно измельчить сетку конечных элементов в областях концентрированного течения, что необходимо для более правильного расчёта высоких градиентов потока (в пограничном слое, например). Общее правило - каждое отверстие должно иметь размер ячеек на стенках $1/40 \dots 1/20$ диаметра. Чем меньший размер имеет сетка, тем точнее будет рассчитан поток, но тем дольше будет выполняться такой расчёт.

В данном примере необходимо наложить два локальных размера: 0,2 мм на внутреннюю полость форсунки и 0,05 мм на внутреннюю полость тангенциального отверстия.

Следует нажать на кнопку Mesh Control в верхней части экрана, затем выбрать Sizing (рисунок 3.4).

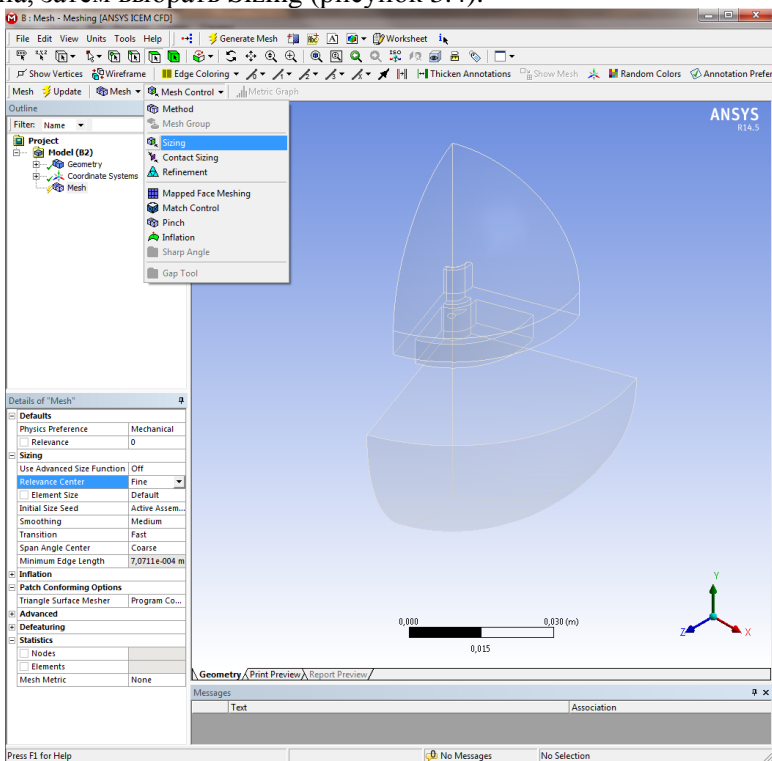


Рисунок 3.4 – Выбор операции Sizing

В появившемся окне в поле Geometry выбрать поверхности внутренней полости форсунки. В Element Size указать размер элемента 0,2 мм (рисунок 3.5).

Шаг 5. Используя тот же метод, «разбить» тангенциальное отверстие, задав размер элемента 0,05 мм (рисунок 3.6).

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	5 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0,2 mm
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

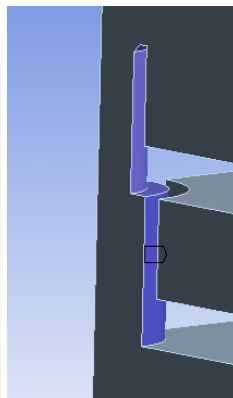


Рисунок 3.5 – Параметры операции Face Sizing на сопле форсунки

Details of "Face Sizing 2" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5,e-002 mm
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

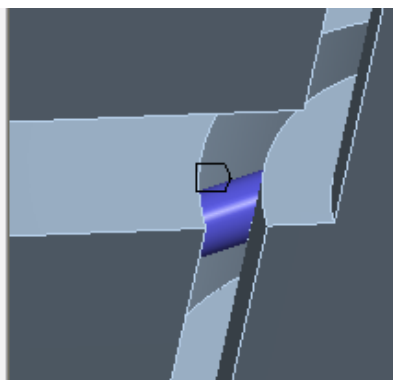
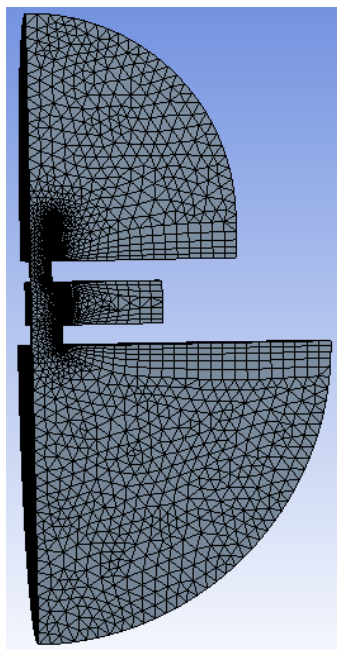


Рисунок 3.6 – Параметры операции Face Sizing на тангенциальном отверстии

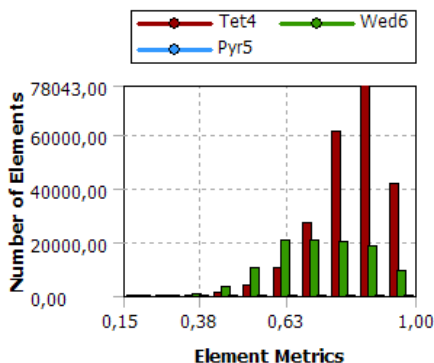
Получаемая после обновления (*Update*) сетка представлена на рисунке 3.7, а.

Шаг 6. Просмотреть данные созданной сетки (рисунок 3.7, б). В дереве модели выбрать Mesh, затем выбрать Statistics в поле Details of Mesh. Здесь нужно посмотреть количество сформированных узлов (*Nodes*) или элементов (*Elements*). Для приемлемого времени расчёта оно должно быть в пределах от 200...600 тыс. элементов. При необходимости нужно скорректировать разрешение сетки, варьируя глобальный размер элементов или размеры элементов локальных заужений.



а

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	96670
<input type="checkbox"/> Elements	324589
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,152747870219089
<input type="checkbox"/> Max	0,999955115518311
<input type="checkbox"/> Average	0,795126276350796
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,120728622836886



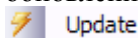
б

Рисунок 3.7 – Результат построения сетки с заужением:

а - визуализация сетки; б - гистограмма свойств сетки: на оси абсцисс лежат значения используемого показателя качества сетки (в данном случае критерий качества Element Quality), по оси ординат - количество элементов

Шаг 7. Просмотреть качество сетки, используя метрику в списке статистики (см. рисунок 3.7, б). В качестве оцениваемого параметра (Element Metrics) можно использовать так называемый критерий качества - Element Quality. Желательно, чтобы элементов с низким качеством (менее 0,1) в сетке не было.

Шаг 8. После построения сетки нужно закрыть сеткогенератор и сохранить проект. Необходимо также убедиться, что элемент Mesh проекта Workbench имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку (рисунок 4.1). Иногда сетка бывает обозначена жёлтой молнией, при этом необходимо выполнить её дополнительное обновление, выбрав в контекстном меню элемента Mesh пункт



4 Создание расчётной модели форсунки

На основе созданной в предыдущем разделе сетки создаётся расчётная модель проточной части форсунки путём наложения граничных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя.

В соответствии с заданными параметрами форсунки (см. раздел 1) должны быть заданы значения требуемых свойств рабочего тела на входных и выходных границах.

Шаг 1. В проекте Workbench из левого меню перемещаем объект CFX из меню Component Systems. Устанавливаем связь между сеткой построенной модели и элементом Setup в объекте CFX (рисунок 4.1). Запустить препроцессор, дважды щелкнув по элементу Setup.

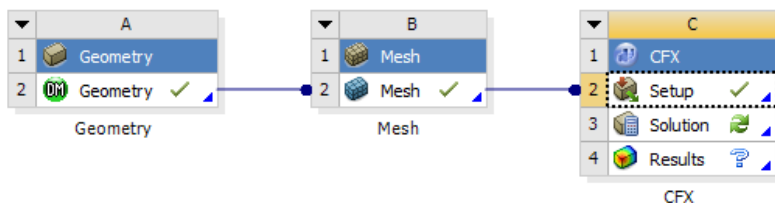



Рисунок 4.1 - Связывание построенной сеточной модели и элемента Setup

В данном расчёте будет смоделировано течение многофазного потока. Перед заданием непосредственно параметров расчётной зоны необходимо в качестве подготовительной операции выполнить задать свойства всех веществ, которые будут использованы для расчёта, а именно горючего, окислителя и газов камеры сгорания.

Параметры продуктов сгорания в камере сгорания и их состав, а также параметры и состав генераторного газа могут быть предварительно посчитаны с использованием специального программного комплекса «ТЕРРА». В данном пособии они приняты условно. Студенты, выполняющие моделирование с использованием данного пособия, должны предварительно определить более точные значения параметров для своего, конкретного случая работы ЖРД.

Шаг 2. Задаём свойства веществ. Свойства жидкого керосина и газообразного кислорода можно взять из базы данных свойств веществ CFX-Pre. Для этого нужно раскрыть список веществ *Materials* ( **Materials**), кликнув на значок (+) слева от него. Далее нажать правой кнопкой на элемент *Materials* и выбрать *Import Library Data* (рисунок 3.2).

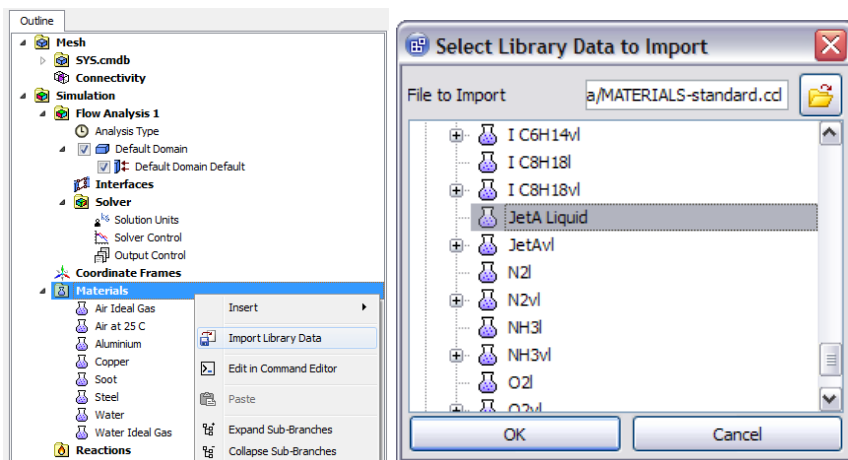


Рисунок 4.2 – Импорт свойств веществ из базы данных CFX-Pre

В появившемся меню есть списки свойств веществ, сгруппированные по типам моделирования. Наиболее полно свойства жидкостей представлены в базе «горение жидкой фазы», поэтому нужно раскрыть список *Liquid Phase Combustion*, там найти компонент *JetA Liquid* (жидкий керосин) и нажать ОК.

Шаг 3. Таким же способом нужно добавить в список веществ газообразный кислород O₂ из базы «горение газовой фазы» (*Gas Phase Combustion*). На первом этапе расчёта плотность окислительного генераторного газа принимается постоянной и равной 94,2 кг/м³. Нужно зайти в свойства кислорода и указав опцию плотности *Value* (значение), задать плотность постоянной (рисунок 4.3)

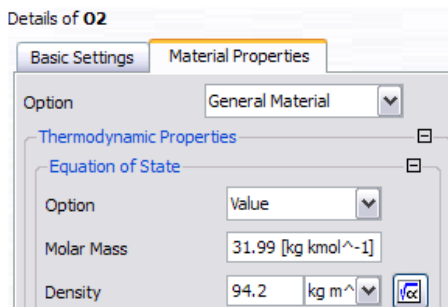


Рисунок 4.3 - Вкладка Material Properties вещества O₂

Шаг 4. Свойства газовых продуктов сгорания, входящих в расчётную зону со стороны камеры из-за возвратных течений, задаются вручную. Для этого нужно нажать правой кнопкой на элемент *Materials*, выбрать *Insert*, затем *Material*. Ввести название материала на латинице, например, *Gas* и нажать ОК.

В появившемся окне нужно задать свойства этого нового вещества. на первой вкладке *Basic Settings* в поле *Thermodynamic State* нужно задать агрегатное состояние вещества - газ (*Gas*).

На вкладке *Material Properties* необходимо в соответствующие поля задать значение плотности (*Density*, в данном случае это 23,79 кг/м³), молярной массы (*Molar Mass*, 30 г/моль), динамической вязкости (*Transport Properties* -> *Dynamic Viscosity*, 4.16e-06 Па·с).

В данном случае будет выполняться моделирование продуктов сгорания с постоянной плотностью. Это оправдано на первом этапе расчёта, поскольку при низких скоростях газа (до 0,3 числа Маха) можно не учитывать изменение плотности газа. Однако в небольших областях вблизи высокоскоростной струи, истекающей из форсунки, скорость газа может быть высока. При этом можно использовать модель идеального газа (*Ideal Gas*) для вычисления плотности с использованием значения молярной массы. Значение 30 г/моль принято в предположении средневзвешенного состава продуктов камеры сгорания ~50% H₂O и ~50% CO₂.

В результате выполненных действий вкладка *Material Properties* должна иметь вид, представленный на рисунке 4.4.

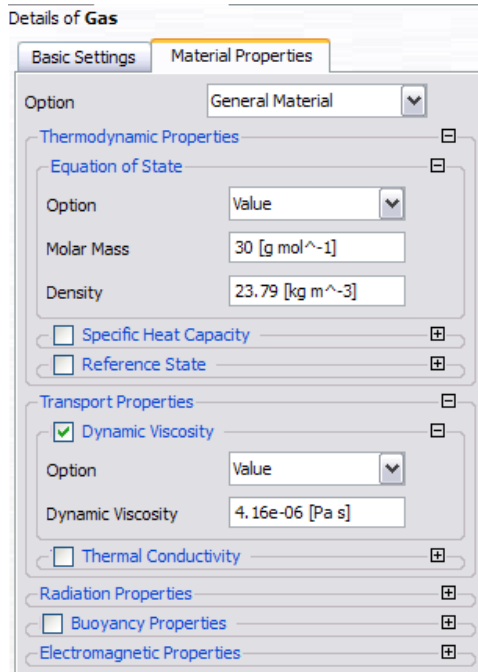





Рисунок 4.4 - Вкладка Material Properties вещества Gas

Шаг 5. Переименовать единственную зону *Default Domain* в *Fluid*, используя опцию контекстного меню *Rename*, затем двойным щелчком мыши открыть свойства этой зоны.

Шаг 6. Необходимо задать в расчётной зоне три фазы. Под фазами здесь условно понимаются не агрегатные состояния вещества, а условно несмешиваемые среды (кислород, продукты из камеры сгорания, керосин). Сначала нужно удалить *Fluid 1*, выбрав его и нажав кнопку *Remove selected item* () . Затем Нажать на кнопку *Add new item* () для добавления в расчёт первой фазы. В поле *Name* ввести название вещества: *Oxygen*. Затем нажать на кнопку () напротив надписи *Material* и выбрать в списке *O2*.

Аналогичным образом добавить фазу *Fuel* с веществом jetA Liquid и фазу газов камеры сгорания Gas с ранее заданным одноименным веществом Gas. Для всех должна быть установлена по умолчанию морфология сплошной среды (Morphology -> Continuous Fluid).

Шаг 7. Установить нулевое ссылочное давление (*Reference Pressure*).

Шаг 8. Задать на вкладке *Fluid Models* значения всех моделей течения (рисунок 4.5). В данном случае должны быть использованы гомогенные (идентичные для всех фаз) модели:

- многофазности - стандартная модель свободной поверхности (*Free Surface Model* -> *Standard*).
- теплопереноса - не моделируется (*Heat Transfer* -> *None*).
- турбулентности - k-ε (*Turbulence* -> *k-Epsilon*).

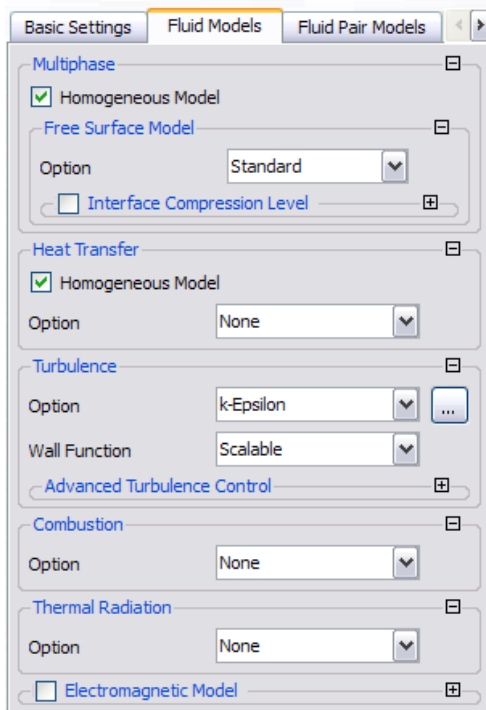


Рисунок 4.5 - Вкладка Fluid Models

Шаг 9. На вкладке *Fluid Pair Models* задать коэффициент поверхностного натяжения керосина (Fuel) на границе со средами Oxygen и Gas (рисунок 4.6). В первом приближении можно принять оба этих коэффициентов равными 0,029 Н/м (коэффициент поверхностного натяжения керосина в воздухе), однако для более точного расчёта этот коэффициент следует задавать более корректно.

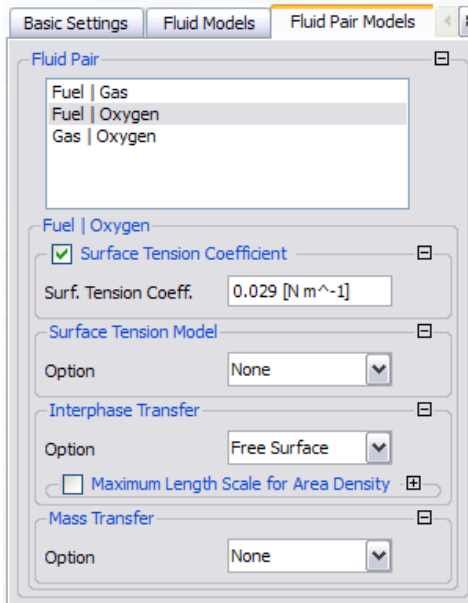



Рисунок 4.6 - Вкладка *Fluid Pair Models*

После задания основных свойств расчётной зоны переходят в заданию граничных условий.

Шаг 10. Задать граничное условие входа окислительного генераторного газа. На верхней панели нажать кнопку Boundary (). Ввести название inlet_oxugen. Нажать ОК. В поле *Location*, указать поверхности, соответствующие входу окислителя (рисунок 4.7).

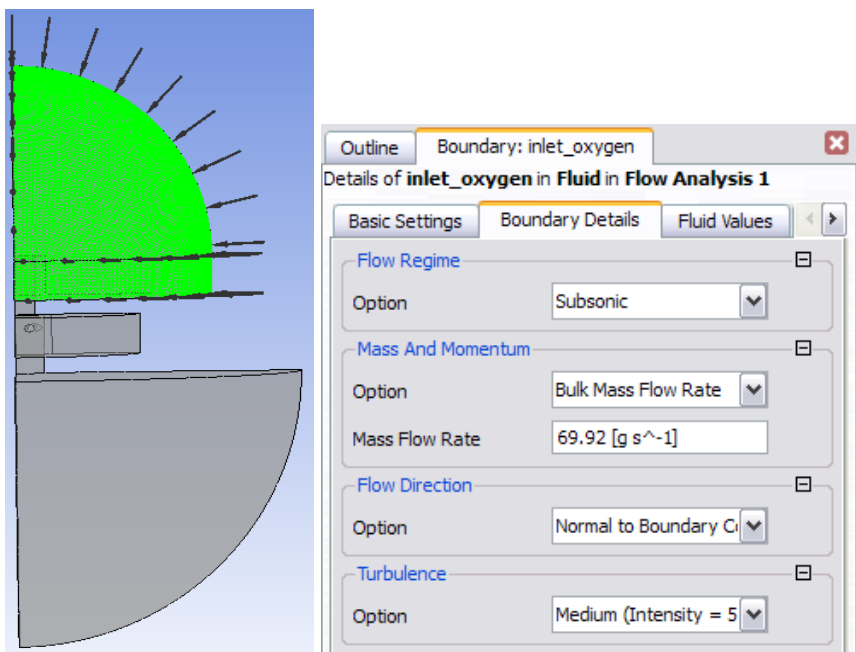


Рисунок 4.7 – Входное граничное условие inlet_oxygen

Нужно задать массовый расход генераторного газа* на вкладке *Boundary Details*:

Bulk Mass Flow Rate -> $279,7 / 4 = 69,92$ g/s. (Обратите внимание на единицы измерения, это не kg/s !)

Четверть расхода берётся из-за того, что моделируется 1/4 форсунки.

На вкладке Fluid Values задать объёмные доли компонентов на данном входе. Поскольку в расчётную зону через данную границу поступает только кислород, то задаются следующие массовые доли:

- Gas -> 0;
- Fuel -> 0;
- Oxygen -> 1.

* в данном случае предполагается, что генераторный газ представлен в основном газообразным кислородом (O₂), однако это предположение может быть не справедливо для другого случая моделирования. Студент должен опираться на расчёты состава и свойств компонентов для своего конкретного случая.

Шаг 11. Повторить действия, описанные в предыдущем шаге для задания граничного условия входа керосина. Задать название `inlet_fuel`, расположение - на входе из полости горючего (рисунок 4.8), расход $274,0 / 4 = 68.5 \text{ g/s}$, массовые доли компонентов:

Gas -> 0;

Fuel -> 1;

Oxygen -> 0.

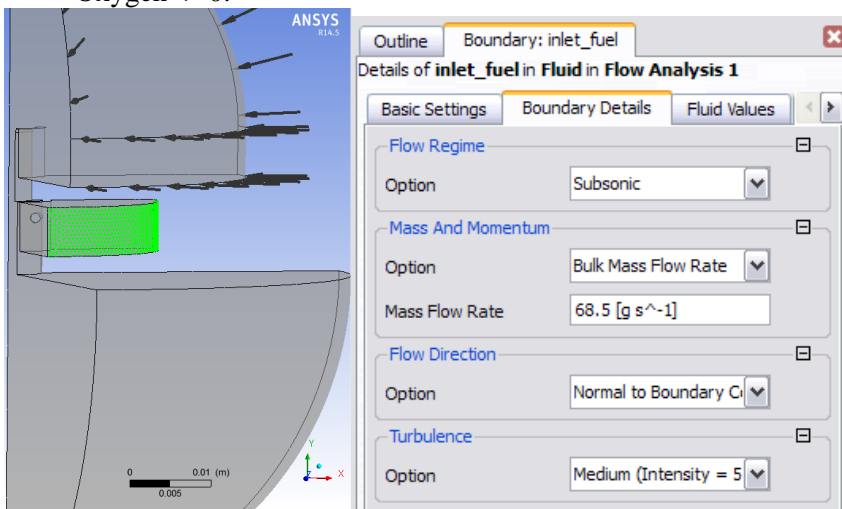


Рисунок 4.8 - Входное граничное условие `inlet_fuel`

Шаг 12. Аналогичным способом задать выходное граничное условие, назвав его `outlet_kamera`. В отличие от предыдущих граничных условий, тип которых был по умолчанию вход (*Inlet*), для данной границы необходимо поставить тип - открытая граница (*Opening*) (рисунок 4.9).

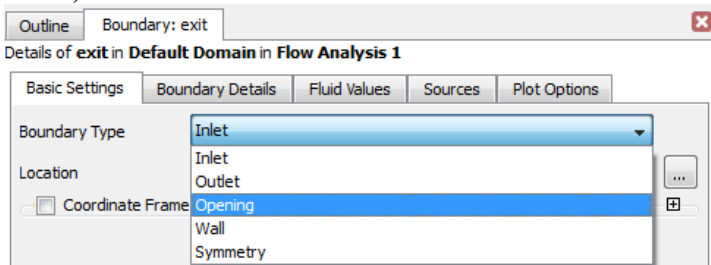


Рисунок 4.9 - Задание типа *Opening* выходной границы `outlet_kamera`

В поле Location нужно указать поверхность выхода (рисунок 4.10), а на вкладке *Boundary Details* задать значение общего давления (*Entrainment*) 17.09 МПа. При этом опцию задания турбулентности необходимо установить *Zero Gradient*.

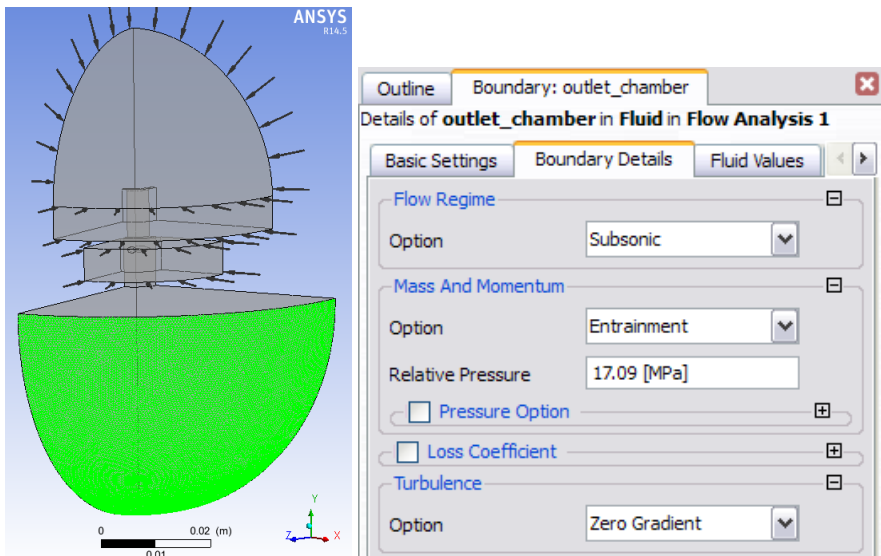


Рисунок 4.10 - Выходное граничное условие inlet_kamera

Как и для предыдущих границ, необходимо задать объёмные доли фаз, втекающих через данную границу:

- Gas -> 1;
- Fuel -> 0;
- Oxygen -> 0.

Шаг 13. Создать периодический интерфейс для расчётной зоны. Для этого добавить интерфейс Insert -> **Domain Interface**, задать название «Periodic», задать в качестве сторон (Side 1, Side 2) - периодические стороны зоны форсунки (perA, perB). Тип интерфейса задать Rotational Periodicity, указать ось вращения (рисунок 4.11)).

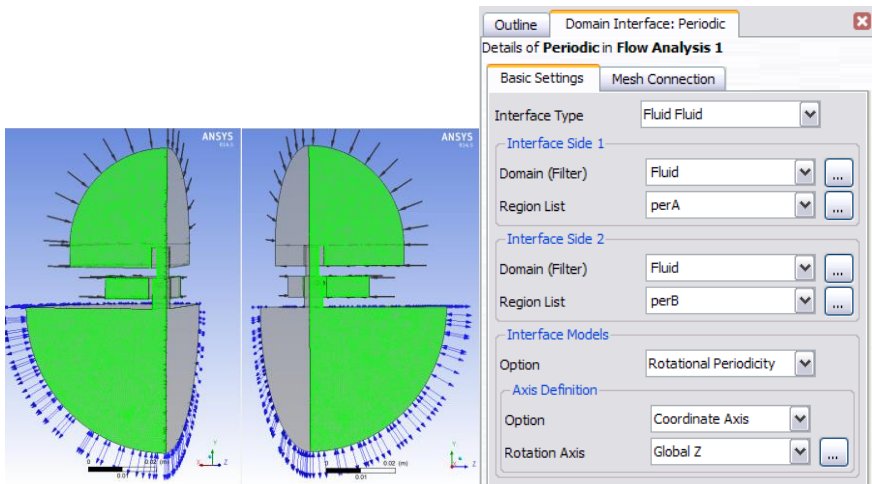


Рисунок 4.11 - Задание сторон периодического интерфейса

Шаг 14. Задать параметры решателя. Для большинства задач подходят параметры по умолчанию, однако иногда от них стоит отказаться. Для этого нужно двойным кликом открыть компонент Solver Control (рисунок 4.12) и задать новые значения. Например, в поле Max. Iterations можно ввести 1000, чтобы задача не останавливалась каждый раз после 100 итераций.

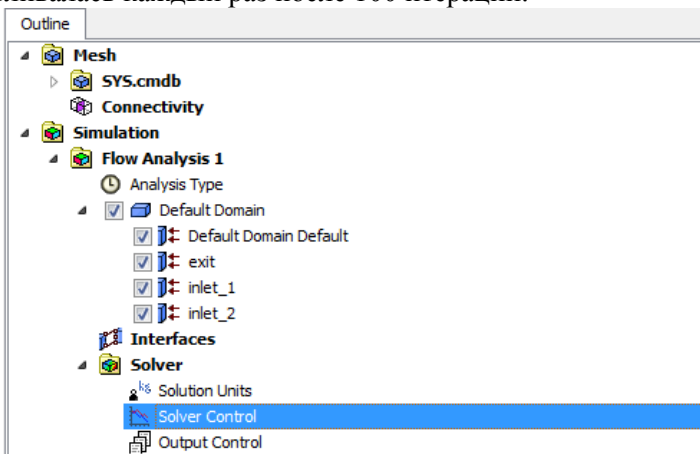


Рисунок 4.12 – Выбор Solver Control

5 Поиск решения

Решение поставленной задачи осуществляется в «решателе», его настройка относительно проста.

Шаг 1. Открыть решатель двойным щелчком на элементе Solution в Workbench (рисунок 5.1). Откроется окно Define Run.

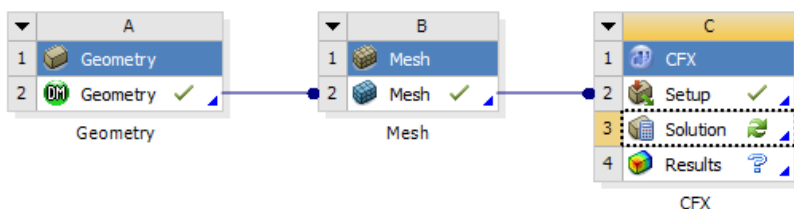


Рисунок 5.1 – Запуск Solution

Шаг 2. Задать параметры многопроцессорного расчёта (рисунок 5.2): Run Mode -> HP Local Parallel (режим распараллеливания задачи - локальный с общей памятью), число параллельных процессов - 2 (или более, по количеству свободных процессоров на используемом компьютере).

Шаг 3. Запустить расчёт, нажав Start Run. Следить за снижением невязок и сообщениями решателя (рисунок 5.3).

Начнётся процесс решения. Ход процесса решения будет отражаться в окне решателя в виде графика «невязок» и информационных сообщений.

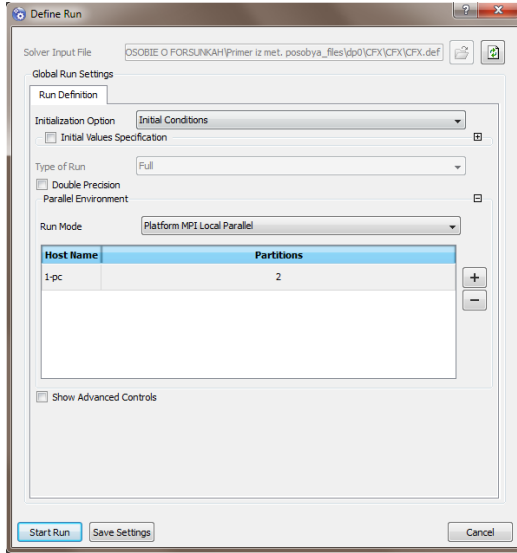


Рисунок 5.2 - Параметры запуска решателя

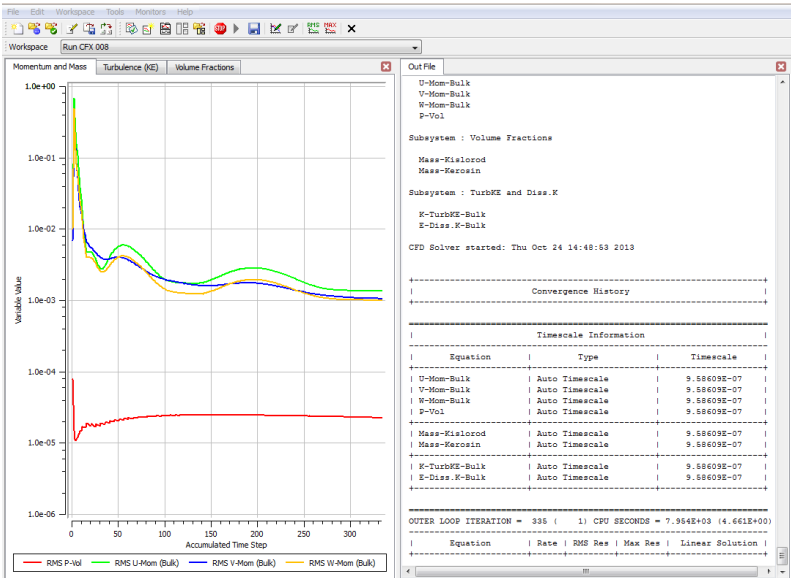


Рисунок 5.3 – Процесс решения

Иногда решатель не запускается. Причиной этому могут быть ошибки в модели, неправильная работа алгоритмов или даже проблемы операционной системы (лицензионные ошибки, доступ к диску и т.п.). Все сообщения об ошибках выводятся в окно решателя (см. рисунок 5.3). Наиболее часто встречающейся ошибкой при решении задач в параллельном режиме является неправильное выделение памяти. Решатель при этом выдаёт сообщение о том, какого количества памяти не хватило для работы алгоритма. Выделение памяти можно пропорционально увеличить, используя повышающий коэффициент Memory Alloc(ate) Factor: 1.2, 1.5, 2 и т.д.

Иногда задача запускается (начинаются итерации), но затем задача завершается некорректно («разваливается»). Это происходит из-за слишком больших градиентов параметров на начальном этапе счёта. Причиной этого могут быть как ошибки в создании модели (сетка с плохим качеством, неправильно введенные числовые параметры), так и слишком высокая скорость решения задач с большими перепадами параметров.

В случае, если модель не содержит ошибок, но, тем не менее, не считается, можно:

1. снизить скорость решения, поставив на начальном этапе решения параметр Timescale Factor менее 1 (0,1; 0,01; 0,001 и т.д.). По мере стабилизации расчёта данный параметр можно ступенчато возвращать к первоначальному значению.

2. исключить флуктуации параметров рабочих тел. Если например была задана переменная плотность газов, то попробовать начать расчёт с постоянной плотностью и т.п..

Для скорейшего достижения правильного решения рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. Увеличивать сложность задачи постепенно. Так, например, если требуется посчитать задачу с переменной плотностью, зависящей от давления и температуры, то рациональнее выполнять решение в несколько этапов. Сначала посчитать задачу с постоянной плотностью без учёта изменения температуры, затем посчитать аналогичную задачу с учётом температуры, затем - с зависимостью плотности только от давления и наконец - с зависимостью плотности от давления и температуры. Поэтапное движение позволяет локализовать

возможную область возникновения ошибки и сократить общее время решения задачи.

2. При задании функциональных зависимостей параметров крайне желательно проверять эти зависимости, например, табулируя функции в Ms Excel или непосредственно в CFX-Pre на вкладке Expressions. Подобные действия позволяют выявить и устранить ошибки ввода сложных выражений, а также проверить, правильно ли программа экстраполирует табличные функции. В случае неверной экстраполяции в таблицу параметров можно добавить фиктивные значения на границе диапазона данных, чтобы предотвратить ложную экстраполяцию.

3. И наконец, при старте усложненной задачи желательно инициализироваться с результатов предыдущей, поскольку старт «с нуля» (с поля параметров, полученного стандартной инициализацией) крайне затруднителен и даже верно поставленная задача может «разваливаться», вводя в заблуждение.

Шаг 4. После завершения расчёта необходимо закрыть решатель. Признаком правильного завершения расчёта является зелёная галочка у элемента Solver в проекте Workbench.

6 Анализ результатов

Для анализа результатов моделирования их необходимо представить в виде полей параметров, линий тока, интегральных значений параметров. Эти процедуры выполняются в постпроцессоре CFD-Post.

Шаг 1. Запустить пост-процессор двойным щелчком на элементе Results. Рассчитанная задача будет загружена в пост-процессор автоматически (рисунок 6.1). Для более понятной визуализации нужно настроить отображение модели.

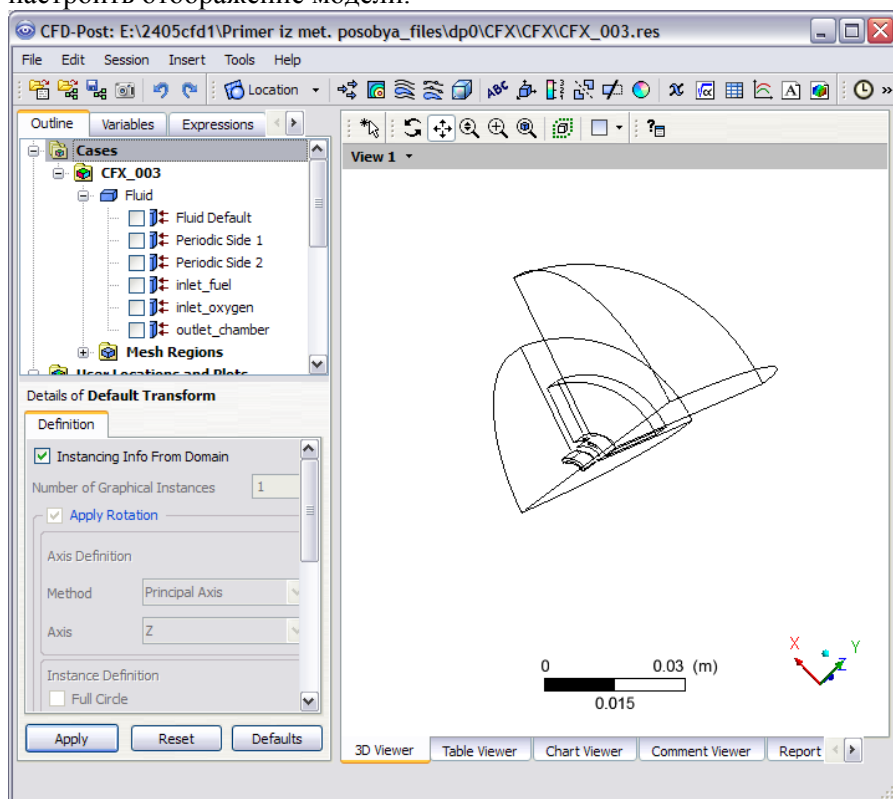


Рисунок 6.1 – Окно постпроцессора с рассчитанной моделью

Шаг 2. Необходимо включить отображение полной модели путём четырёхкратного копирования данных с секторной модели 1/4. Для этого дважды щелкаем на элементе Fluid в дереве проекта и в окне свойств задаём параметры (рисунок 6.2):

Number of Graphical Instances -> 4

Instance Definition -> Custom

Установить галочку *Full Circle* (полный круг)

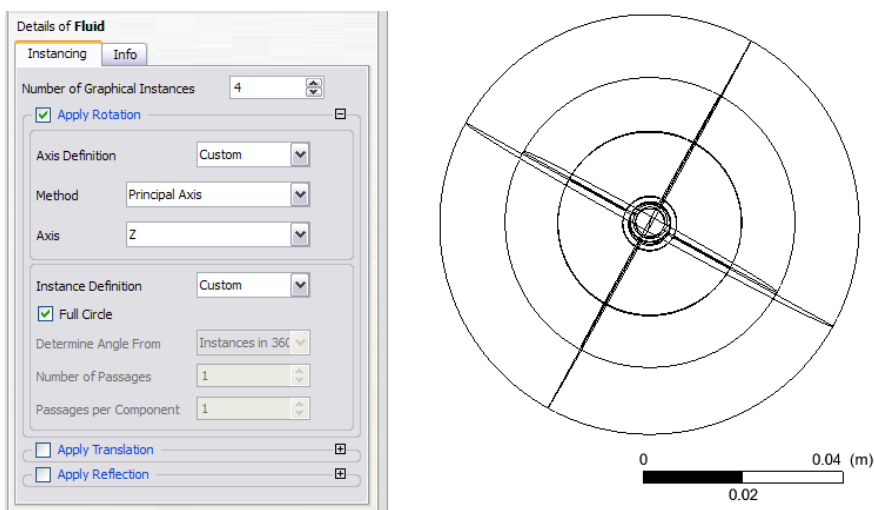


Рисунок 6.2 – Включение отображения полной модели копированием четвертной расчётной зоны

Шаг 3. Для более понятного восприятия геометрии лучше отойти от каркасного изображения (см. рисунки 6.1 и 6.2) и использовать заливку цветом. Для этого, во-первых, нужно включить (поставить галочку) элемент дерева проекта *Fluid Default*, отвечающий за непроницаемые границы форсунки, а во-вторых снять галочку с элемента *Wireframe* (рисунок 6.3).

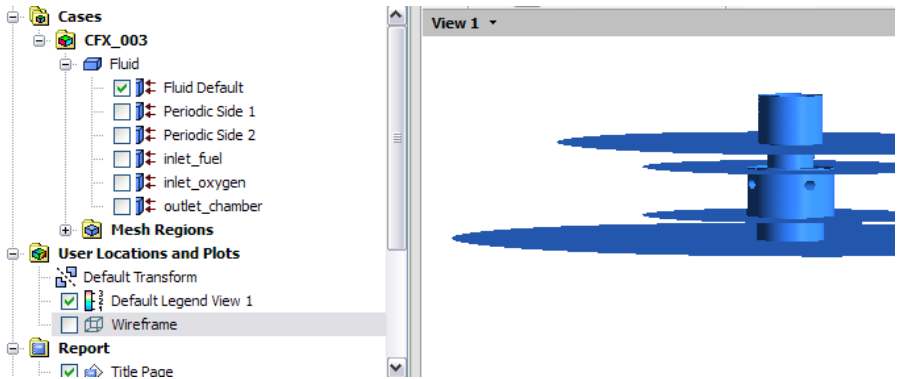


Рисунок 6.3 – Включение визуализации границ цветом

Шаг 4. Также можно настроить цвет и прозрачность отображения границ. Для этого нужно дважды щелкнуть по элементу *Fluid Default* и задать его параметры (рисунок 6.4):

Цвет -> Серый;

Прозрачность (*Transparency*) -> 0.6

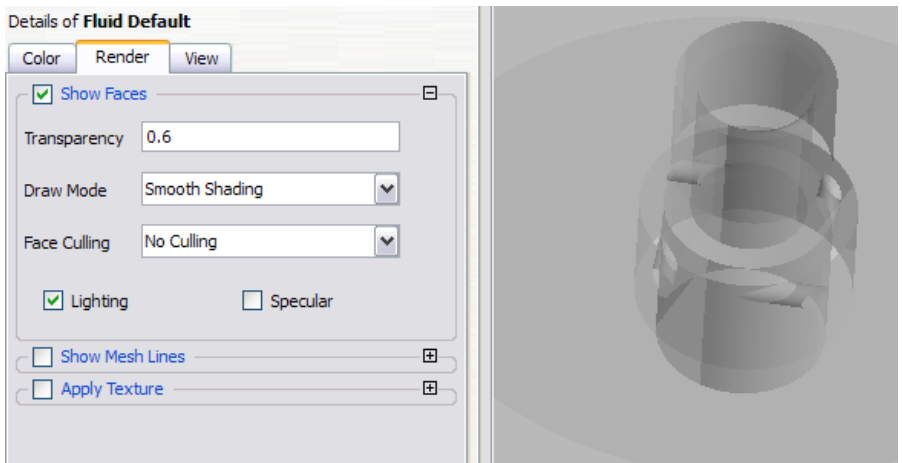


Рисунок 6.4 – Включение визуализации границ цветом

После настройки отображения геометрии можно переходить к визуализации потока.

Шаг 5. Построить линии тока (*Streamline*) последовательно для трёх случаев: линии тока окислителя, начинающиеся от входа окислителя, линии тока горючего, начинающиеся от входа горючего и линии тока газа из камеры сгорания, начинающиеся от выхода. Проследить, верно ли распределён поток по расчётной зоне (рисунки 6.5...6.7).

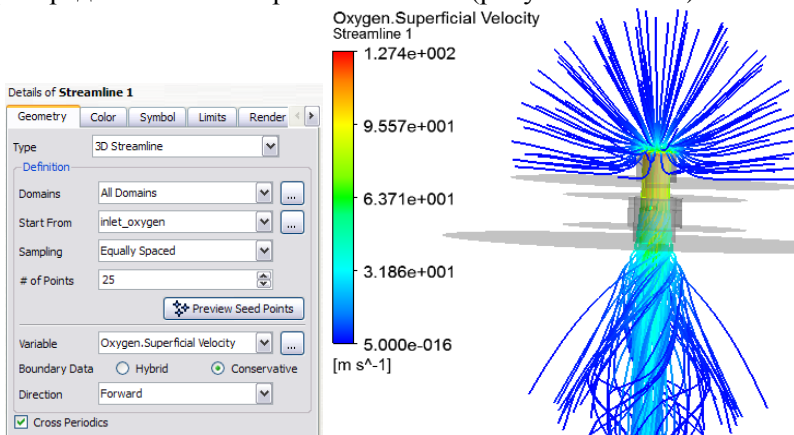


Рисунок 6.5 – Параметры и картина линий тока окислителя

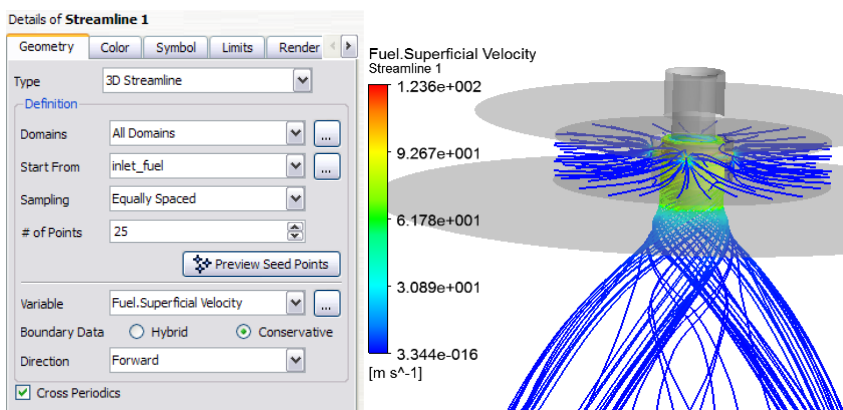


Рисунок 6.6 – Параметры и картина линий тока горючего

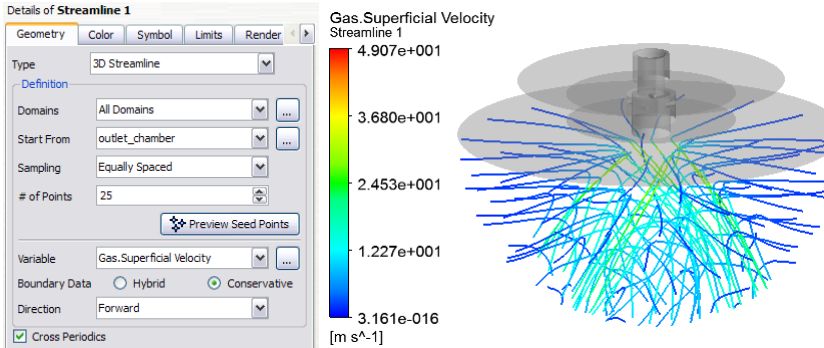


Рисунок 6.7 – Параметры и картина линий продуктов сгорания

Как видно из рисунка 6.7, продукты сгорания, по видимому, поступают в расчётную зону с боковых сторон и, увлекаясь струёй форсунки, начинают движение вместе с ней. Таким образом, наблюдается явление эжекции продуктов сгорания. Убедиться в этом можно, построив векторное поле.

Шаг 6. Создаём векторное поле. Для этого отключаем отображение (снимаем галочку) элемента *Streamline* и добавляем новый элемент *Vector* (рисунок 6.8). Для отображения используем боковые периодические поверхности (*Periodic Side 1* и *Side 2*). Если длина векторов малая, можно использовать их масштабирование (*Symbol Size* на вкладке *Symbol*).

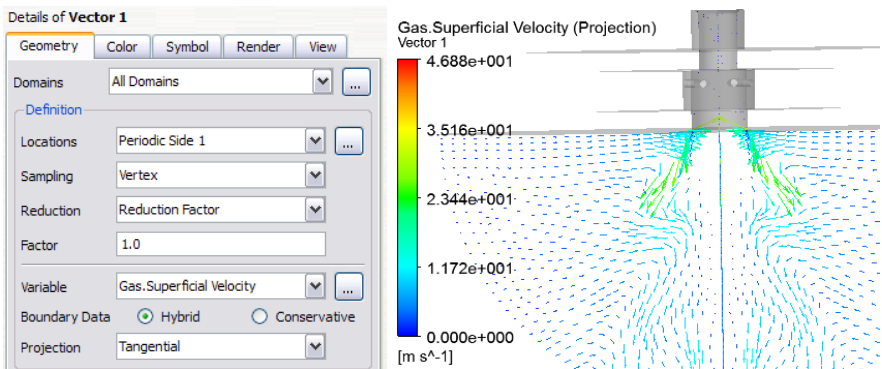


Рисунок 6.8 – Параметры и картина векторного поля продуктов сгорания

Шаг 7. Аналогичные векторные картины можно построить для горючего и окислителя (рисунки 6.9 и 6.10).

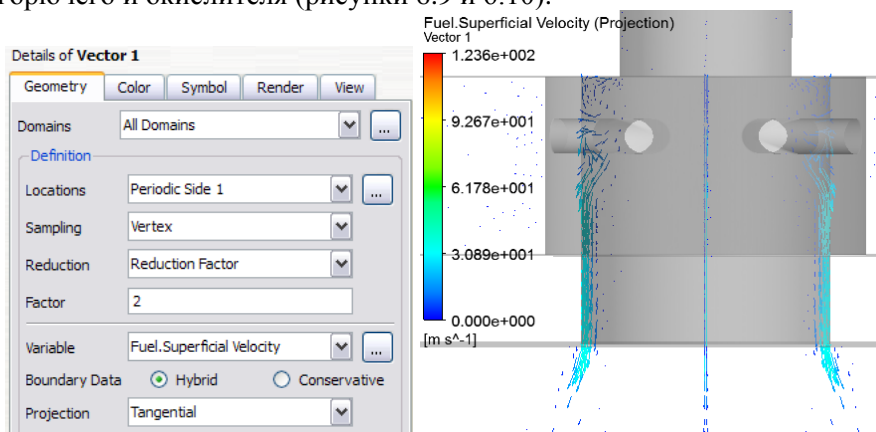


Рисунок 6.9 – Параметры и картина векторного поля горючего

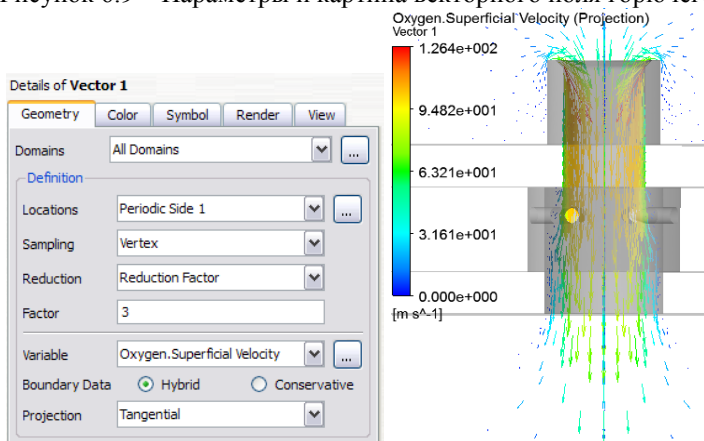


Рисунок 6.10 – Параметры и картина векторного поля окислителя

Шаг 8. Кроме векторных картин на поверхностях периодики можно посмотреть поля распределения любых параметров, например давления или скорости. Конечно более интересным для анализа является просмотр полей концентраций (*Volume Fraction*) того или иного компонента. Для его просмотра нужно использовать визуализатор *Contour*. Параметры настройки этого инструмента и результаты визуализации представлены на рисунках 6.11...6.13.

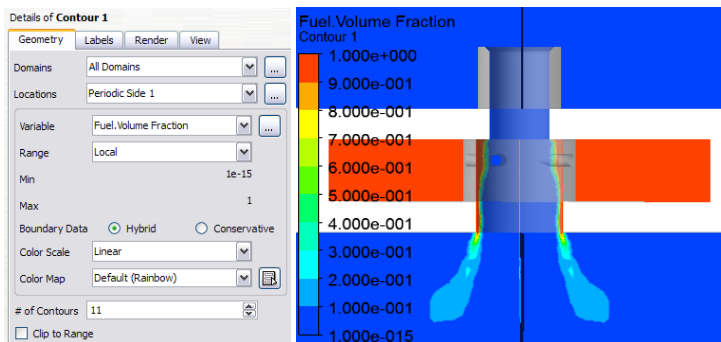


Рисунок 6.11 – Параметры и картина контура концентрации окислителя

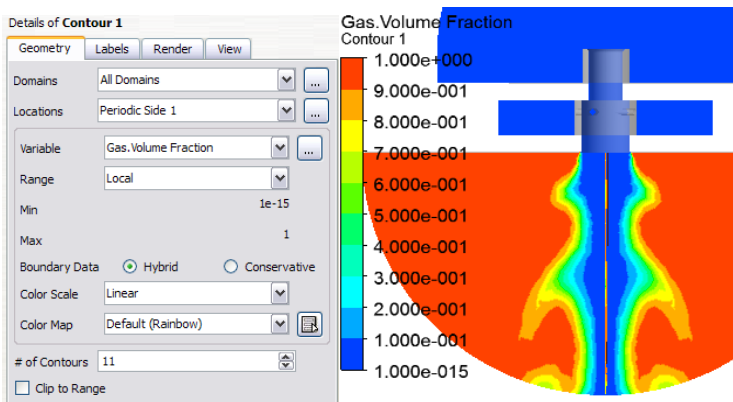


Рисунок 6.12 – Параметры и картина контура концентрации горючего

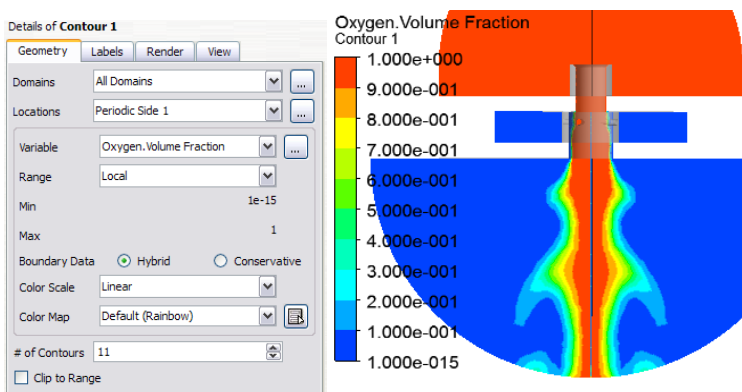


Рисунок 6.13 – Параметры и картина концентрации продуктов сгорания

Полученные в расчёте колебания струи на выходе (см. рисунки 6.12...6.13) могут являться как реальной физической нестационарностью процесса, так и расчётной ошибкой. Источники ошибок, пути их выявления и устранения описаны в следующем разделе.

Шаг 8. Для визуальной оценки распространения компонентов на выходе из форсунки можно использовать так называемые изоповерхности (*Location* -> *Isosurface*). Строя изоповерхность определенной концентрации, например, горючего, можно отследить пути его распространения (рисунок 6.14). В этом случае с одной стороны изоповерхности объёмная доля горючего в потоке ниже заданного значения, а с другой - выше.

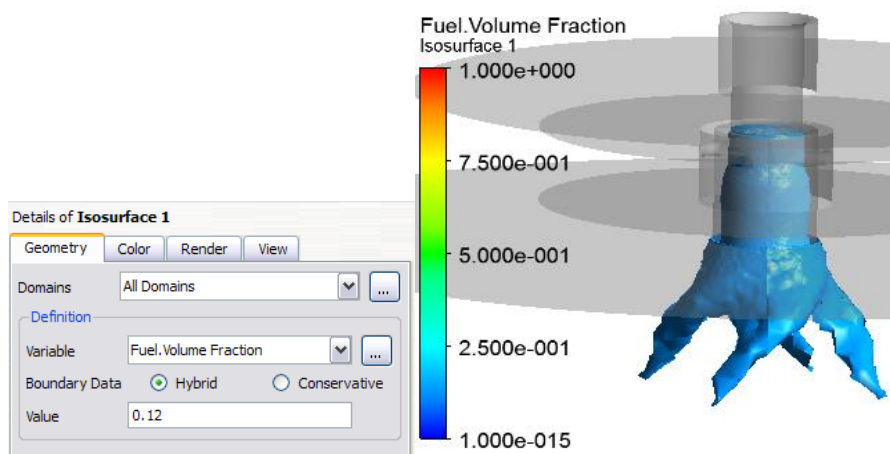


Рисунок 6.14 – Параметры и вид изоповерхности концентрации горючего

Используя такие картины можно визуально оценить угол выхода топлива из форсунки. Однако числовые значения с точностью до градуса получить довольно сложно, поскольку фронт межфазного перехода может быть «размыт» ввиду плавного изменения концентраций. В этом случае можно воспользоваться следующей методикой оценки угла.

Шаг 9. Для количественной оценки угла выхода компонентов из форсунки в продольном сечении форсунки строятся две линии, перпендикулярные её оси симметрии (рисунок 6.15). *Line 1* - в начале обмеряемого факела, на расстоянии z_1 от сопла форсунки (т. М), и *Line 2* - в конце, на расстоянии z_2 .

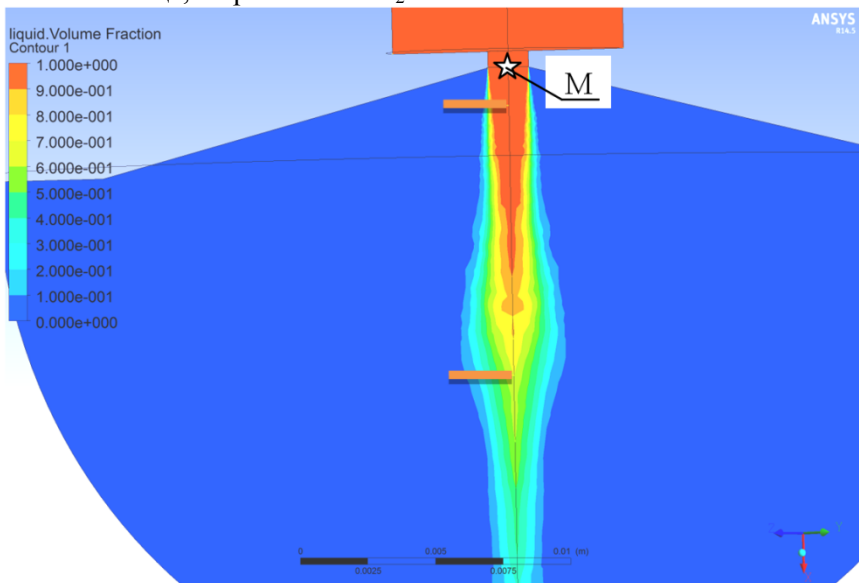


Рисунок 6.14 – Построение линий перпендикулярно оси симметрии форсунки

Далее в CFD-Post строятся графики (Chart) концентрации истекающего компонента на этих линиях (рисунок 6.15). На графиках отображается концентрация компонента вдоль расстояния от оси форсунки. На рисунке 6.15 концентрация представлена в долях единицы, а расстояние в метрах.

По графику определяется расстояние 10% максимальной концентрации компонента в сечении данной линии (рисунок 6.16). Так, например, для первой линии (Series 1) максимальная концентрация равна единице, а расстояние r_1 соответствует точке с концентрацией 0,1. Для второй линии (Series 2) максимальная концентрация равна 0,7, а расстояние r_1 соответствует точке с концентрацией 0,07

По измеренным значениям можно восстановить схему факела (рисунок 6.17) и вычислить значение угла распыла:

$$\alpha = \arctg \frac{r_2 - r_1}{z_2 - z_1} \dots$$

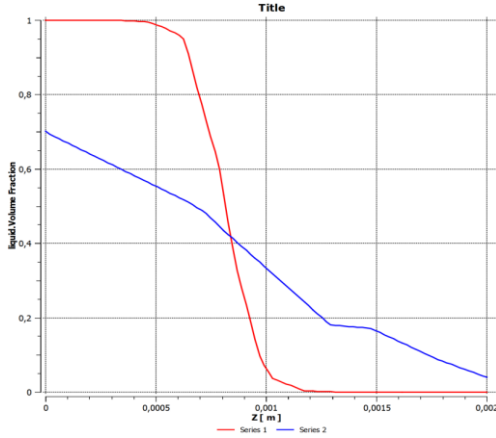


Рисунок 6.15 – Графики концентрации компонента на двух линиях, перпендикулярных оси

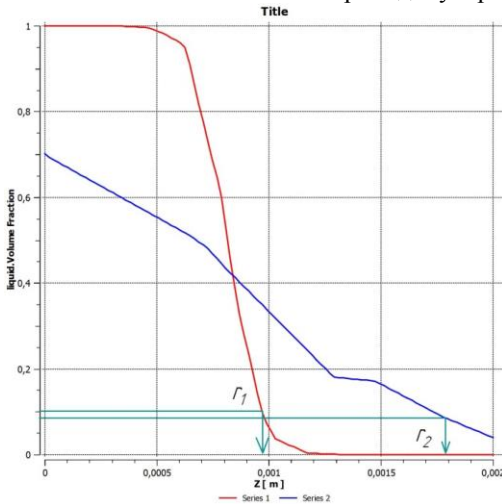


Рисунок 6.16 – Определение радиуса 10%-й концентрации

След плоскости выходящего сечения форсунки

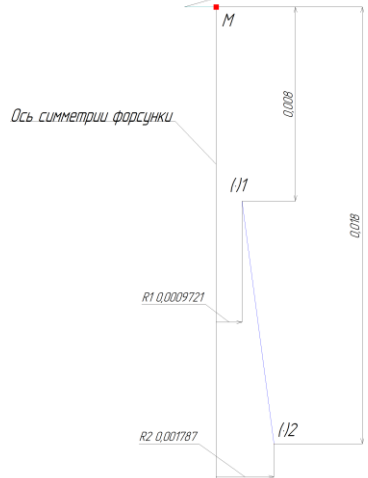
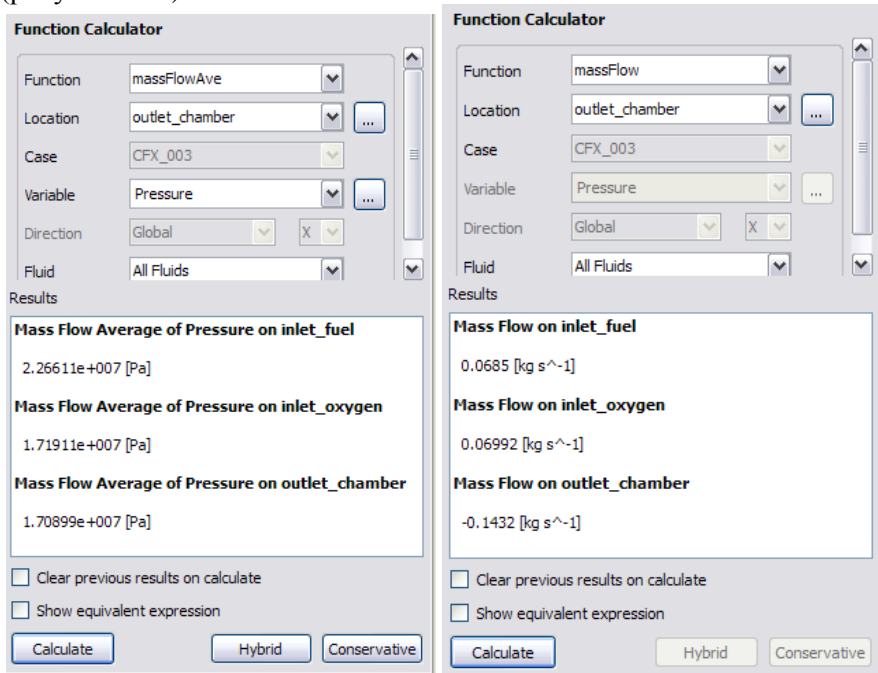


Рисунок 6.17 – Схема факела с характерными точками в начале и в конце

Шаг 10. Для оценки интегральных параметров потока необходимо перейти на вкладку Calculators и выбрать (дважды щелкнуть) Function Calculator. Используя калькулятор функций можно получить значения интегральных параметров (массового расхода, среднего давления, скорости) на поверхностях входа и выхода компонентов (рисунок 6.18).



а б
Рисунок 6.18 - Определение интегральных значений потока:
а - давления на границах, б - массовые расходы через границы

Используя эти значения, можно определить интегральные параметры форсунки, например, вычислить коэффициент расхода каждого компонента по формуле:

$$\mu = \frac{\dot{m}_\phi}{F_c \sqrt{2\rho \cdot \Delta p_\phi}}$$

Шаг 11. Провести сравнение полученных результатов с имеющимися данными аналитического расчёта, сравнив параметры работы форсунки, как полученные непосредственно из программы (таблица 3), так и интегральные (таблица 4).

Таблица 3 - Анализ первичных параметров моделирования форсунки

Параметр	Результат аналитический	Результат CFD-расчёта
Расход окислителя*, г/с	279,7	279,7
Расход горючего*, г/с	274,0	274,0
Давление на входе окислителя, МПа	18,09	17,19
Давление на входе горючего, МПа	18,08	22,66
Давление на выходе из форсунки*, МПа	17,09	17,09
Средний угол факела распыла, градусы	55,8	45

Таблица 4 - Анализ интегральных параметров моделирования форсунки

Параметр	Результат аналитический	Результат CFD-расчёта
Перепад давления окислителя, кПа	1000	10
Перепад давления горючего, кПа	991	557
Коэффициент расхода окислителя	0,8130	3,67
Коэффициент расхода горючего	0,0126	0,175

Сравнивая результаты CFD-анализа и параметры, полученные аналитическим методом (см. таблицы 3 и 4), можно выявить грубые ошибки того или иного метода расчёта, если результаты не совпадают на порядок или вообще неверные с физической точки зрения (см. коэффициент расхода). Например, при CFD-моделировании нередки случаи задания неверных (кратных) расходов или моделирование геометрии в неверном масштабе. В этом случае нужно найти и устранить ошибки.

Если же порядки результатов сходятся, то можно говорить о сравнении результатов. При этом точное CFD-моделирование может обладать погрешностями, которые сложно оценить для одного расчёта, но их можно оценить и устранить, проведя серию расчётов (см. следующий раздел).

* Несмотря на то, что данный параметр был задан в качестве граничного условия, его значение нужно проконтролировать, чтобы убедиться в корректности решения задачи.

7 Погрешности при CFD-моделировании

Результаты любого CFD-моделирования содержат погрешности, которые можно условно разделить на четыре класса [7]:

- *ошибки округления*, связанные с тем, что числа в памяти компьютера представляются с конечной точностью;

- *ошибки сходимости или ошибки недостаточного количества итераций*, связанные с тем, что поставленная система уравнений, правильно описывающая задачу, была сведена не достаточно точно при ограниченном количестве расчётных итераций;

- *ошибки дискретизации*, связанные с конечной точностью представления гладких функций на расчётной сетке с конечным размером элементов;

- *ошибки применяемых при расчёте моделей* (многофазности, турбулентности и т.п.);

- *системные ошибки*, вызванные некорректной постановкой моделирования (например, решение задачи, имеющей несимметрию процесса в симметричной постановке);

- *ошибки пользователя*.

Большие ошибки округления возникают при использовании сеток с большой разницей размеров соседних ячеек (контролируется соотношением размеров сторон ячеек Aspect Ratio и соотношением размеров соседних элементов Length Scale), а также при большом диапазоне изменения параметров. Для снижения ошибок округления рекомендуется [7] применять двойную точность (Double Precision) представления вещественных чисел в памяти компьютера взамен одинарной (Single Precision).

Ошибки сходимости могут быть продемонстрированы на примере модельной задачи - потока через лопаточный венец (рисунок 7.1). Решение поставленной задачи в виде системы уравнений Навье-Стокса происходят итерационным методом. При этом на каждой итерации решателем по определенному алгоритму подбираются новые значения переменных. При этом так называемой «невязкой» оценивается степень «нерешенности» каждого уравнения, т.е. уровень ошибки - неравенства нулю правой части уравнения, записанного в стандартном виде. Чем ниже невязка, тем правильнее решение. Как правило, при корректно поставленной задаче решение происходит в целом достаточно монотонно, т.е. с течением итераций

невязки снижаются, однако могут быть и временные исключения (см. рисунок 4.11).

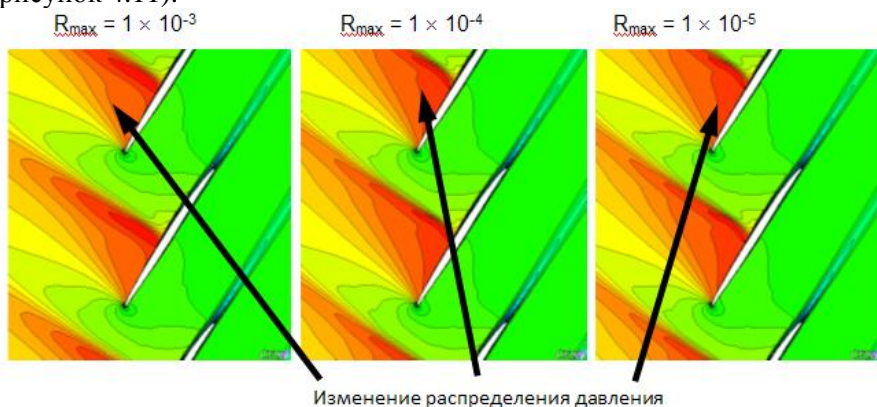


Рисунок 7.1 – Изменение полей распределения давления при уменьшении максимальных невязок [7]

В общем случае, невозможно точно предсказать, сколько итераций понадобится для сведения задачи с требуемой точностью. Это можно определить только пробным путём, оценивая, насколько изменяются параметры по ходу расчёта (рисунки 7.1-7.2). При достижении устойчивого поведения расчётной модели, можно говорить о её достаточном сведении, т.е. при проведении дополнительных итераций изменения получаемых при расчёте параметров меньше необходимой точности. Например, если при дополнительном итерировании значение КПД изменяется на уровень меньше 0,01% при максимальных невязках $R_{\max}=10^{-3}$, то смысла проводить итерации дальше нет, если желаемая точность получения КПД - например, на уровне 0,1%.

Ошибки дискретизации имеют место всегда при расчётах, использующих конечную дискретизацию пространства (сетка) или времени (расчётные шаги). Уровень этих ошибок сложно оценить заранее. На рисунке 7.3 представлены результаты решения (максимальный критерий Нусельта Nu_{\max}) для модельной задачи, разрешенной на сетках с разным количеством ячеек (N_{Cells}) при использовании первого и второго порядка дискретизации решателя.

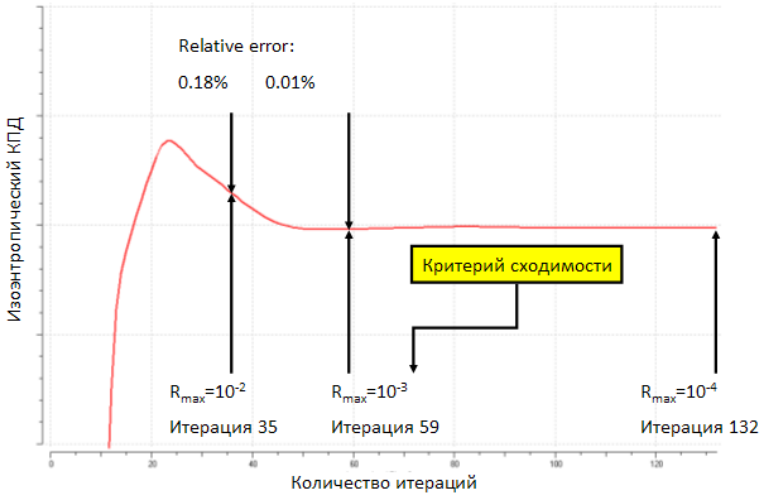


Рисунок 7.2 – Изменение полей распределения давления при уменьшении невязок [7]

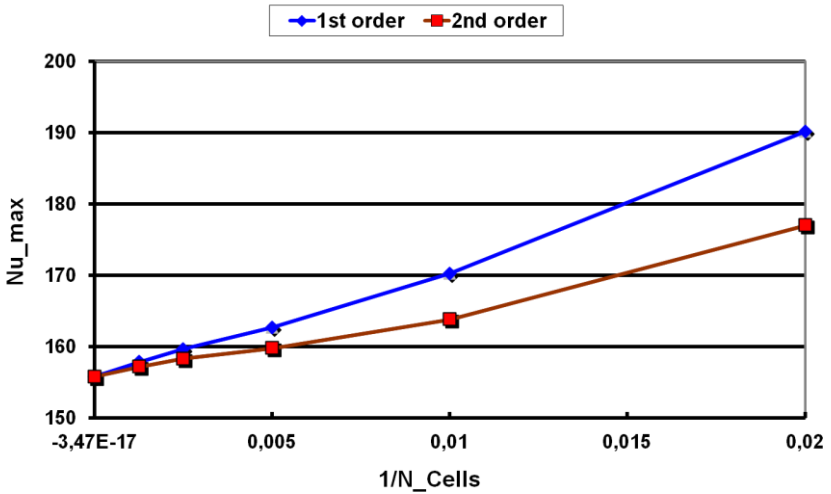


Рисунок 7.3 – Изменение полей распределения давления при уменьшении невязок [7]

Хорошо видно, что при увеличении размерности сетки с поля 50x50 элементов ($1/N_Cells=0,02$) до 800x800 элементов (0,005) погрешности расчёта, вызванные дискретизацией, снизились с 22,1% до 1,1% для решателя первого порядка и с 13,6% до 0,7 для решателя второго порядка. Таким образом, применение на одной и той же сетки решателя с дискретизацией уравнений функциями второго порядка предпочтительнее. Однако иногда он менее стабилен по сравнению с решателем первого порядка.

Что же касается методики нивелирования погрешностей дискретизации, то базовым является так называемый метод исследования сеточной сходимости. Его суть в последовательном увеличении степени дискретизации сетки (см. рисунок 7.3) до тех пор, пока изменения искомого результата, вызванные очередным улучшением сетки, не окажутся меньше необходимой точности. В таблице 4 приведена иллюстрация данной методики при CFD-расчёте по определению параметров струйной форсунки. Как видно из таблицы 4, обе методики определения параметров струйной форсунки дают качественно одинаковые результаты. Однако, количественные значения при увеличении качества расчётной сетки приближаются к истинным. При дальнейшем увеличении числа конечных элементов эти различия будут уменьшаться до тех пор, пока качество сетки перестанет вносить значимую погрешность в результаты. Иногда сеточная сходимость обладает немонотонностью. Так, например, с увеличением качества сетки параметр может отдалиться от верного значения, а при дальнейшем увеличении качества сетки опять приблизится (см. угол распыла).

Таблица 4 - Сравнение вариантов расчёта струйной форсунки

Вариант расчёта	Перепад давления на форсунке Δp_{ϕ} , МПа	Массовый расход \dot{m}_{ϕ} , г/с	Коэффициент расхода форсунки μ	Угол распыла α
CFD-расчёт (10 тыс. эл.)	0,5565	316,2	0,8087	10°
CFD-расчёт (100 тыс. эл.)	0,4931	303,7	0,8672	12°
CFD-расчёт (500 тыс. эл.)	0,4531	301,7	0,8872	11°
Аналитический расчёт [7]	0,4403	300,0	0,8991	-

Кроме перечисленных ошибок, имеющих чисто математическую (вычислительную) природу, на точность расчёта оказывают влияние и другие факторы. Иными словами даже идеально посчитанная с математической точки зрения система уравнений Навье-Стокса может давать результаты, отличающиеся от результатов физического эксперимента. Причиной этого могут быть ошибки применяемых в расчёте моделей и ошибки методики постановки задачи (их называют методические ошибки, встречается также термин системные ошибки). Ошибки моделей - это погрешности, вызванные неидеальностью специальных видов моделирования (кроме базовых уравнений Навье-Стокса): многофазности, турбулентности, изменения параметров рабочего тела и т.д. Например, результаты решения одной и той же задачи, выполненного с применением разных моделей турбулентности могут значительно отличаться как друг от друга так и от экспериментальных данных (рисунок 7.4).

Методические ошибки моделирования возникают в основном при неправильном ограничении расчётной области. Поскольку всё решение идёт в замкнутой области, параметры границ (расположение, свойства), оказывают сильное влияние на происходящие процессы. Так, например, расчёт, выполненный на модели, включающей одну форсунку, не будет учитывать влияния соседних форсунок, имеющее место быть при реальном рабочем процессе ЖРД. То же самое касается свойств рабочего тела. Моделирование течения жидкости с постоянными свойствами априори будет отличаться от реального физического процесса течения, в котором параметры (вязкость, теплоёмкость и т.п.) в общем случае переменны. То же самое можно сказать о методологических ограничениях модели. Например, если модель течения изначально построена на предположении неразрывности, то решение, выполненное с помощью такой модели изначально неспособно выявить, например, кавитационные процессы.

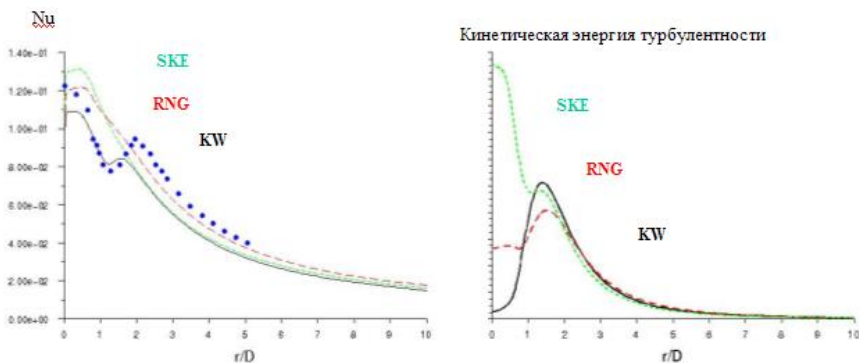


Рисунок 7.4 – Сравнение [7] результатов решения модельной задачи теплопереноса в потоке, полученных с использованием моделей турбулентности Standart k-ε, RNG k-ε, k-ω, с экспериментальными данными

Методика исключения погрешностей моделей и методологических погрешностей численного решения аналогична устранению иных погрешностей, т.е. это последовательные пробные расчёты, результаты которых сравниваются с экспериментом или между собой с целью выявить вариант наиболее правильно отражающий течение. Например, следующим этапом описанного в учебном пособии расчёта может быть расчёт со сжимаемостью, т.е. не с постоянной плотностью генераторного газа и продуктов камеры сгорания, а с переменной плотностью, вычисляемой, например, по закону идеального газа (*Density* -> *Ideal Gas*). Результаты такого расчёта будут точнее предыдущего, поскольку из них будет исключена методическая погрешность задания плотности константой.

8 Особенности моделирования форсунок различных типов

Описанная в данном учебном пособии технология моделирования является универсальной и может использоваться для моделирования форсунок любых типов. Однако при моделировании отдельных типов форсунок можно выделить некоторые особенности, порой значительно облегчающие расчёт. Они будут описаны в данном разделе.

Для моделирования рабочего процесса струйной форсунки может применяться модель её внутренней полости, включающая области входа и выхода рабочего тела не полная, а секторная (рисунок 8.1), поскольку данный тип форсунок обладает не просто симметрией, а круговой периодичностью, течение в струйной форсунке носит фактически двумерный характер. Время решения секторной модели 1/360-ой всего внутреннего объёма форсунки будет на порядок меньше.

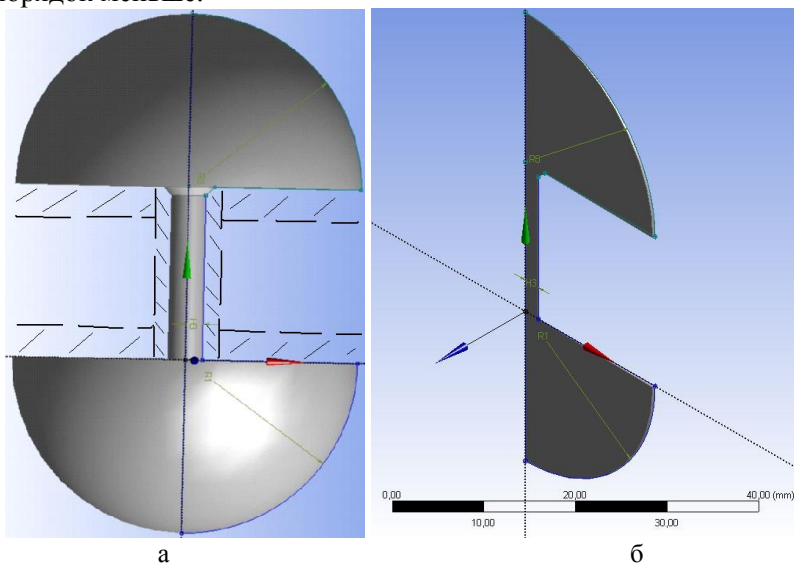


Рисунок 8.1 – Модель для расчёта течения через струйную форсунку:
а - полная, б - секторная

На полученную геометрию накладывается сетка конечных элементов (рисунок 8.2) со следующими особенностями:

- для моделирования объёмной сетки применяется метод протяжки двумерной сетки (Sweep) в направлении круговой периодичности (рисунок 8.2, а). Поскольку при этом моделируется фактически двумерное течение, к направлению протягивания (в третьем измерении) нет смысла разбивать сетку более, чем на 1 элемент;

- на гранях модели, соответствующих стенкам форсунки, для более точного моделирования пограничного слоя задаётся измельчение сетки инструментом Local Sizing.

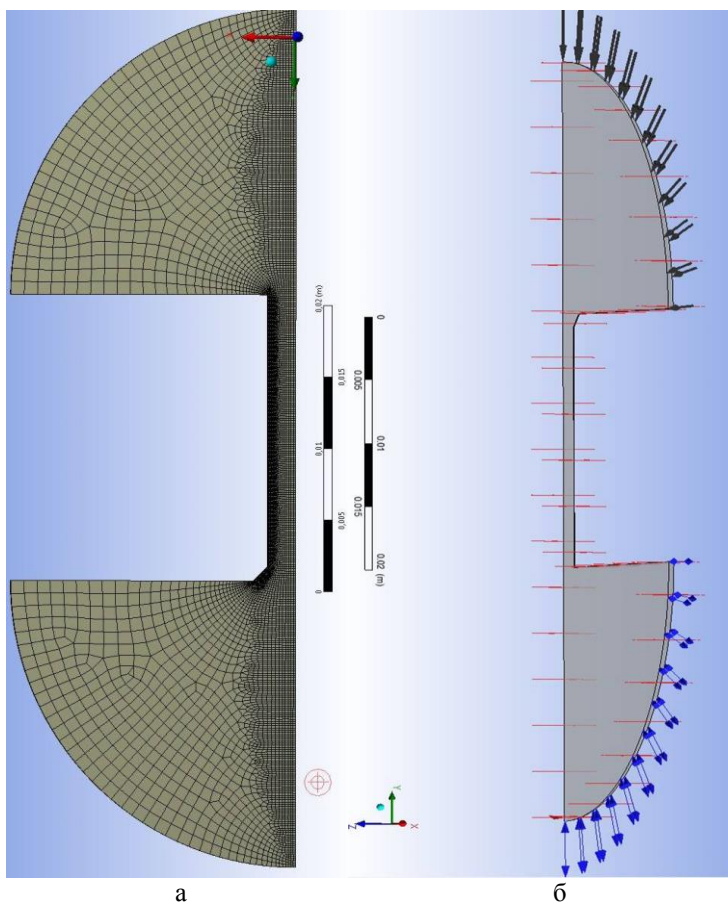


Рисунок 8.2 – Сеточная (а) и расчётная (б) модели струйной форсунки

Модель течения задаётся аналогично общей методике, однако входные и выходные грани в данном случае представлены узкими полосами полусфер (рисунок 8.2, б). Расход задаётся в соответствии с кратностью расчётной зоны: для сектора в 1 градус (1/360-я полной модели) это 1/360-я часть полного расхода. Боковые поверхности (плоскости среза сектора) являются границами «симметрии», т.е. абсолютно скользкими непроницаемыми стенками.

Результаты расчётов в программе ANSYS CFX в виде линий тока и полей распределения концентрации фаз представлены на рисунке 8.3.

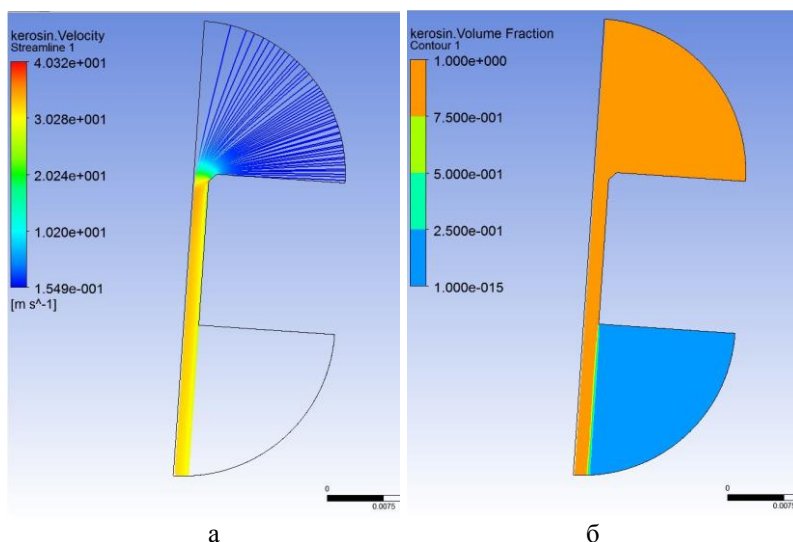


Рисунок 8.3 – Результаты моделирования потока в струйной форсунке:
а - линии тока, б - распределение концентрации фаз

На рисунке 8.4 представлен порядок моделирования газожидкостной струйно-струйной форсунки с внутренним смешением. В данном случае нельзя обойтись двумерной постановкой. Поскольку подвод из полости между средним и огневым днищами имеет 4 подводящих отверстия, то для моделирования используется 1/4 часть модели. Для формирования более качественной сетки на область стенок внутри форсунки накладываются более мелкие элементы, чем в основной области (см. рисунок 4.26, в).

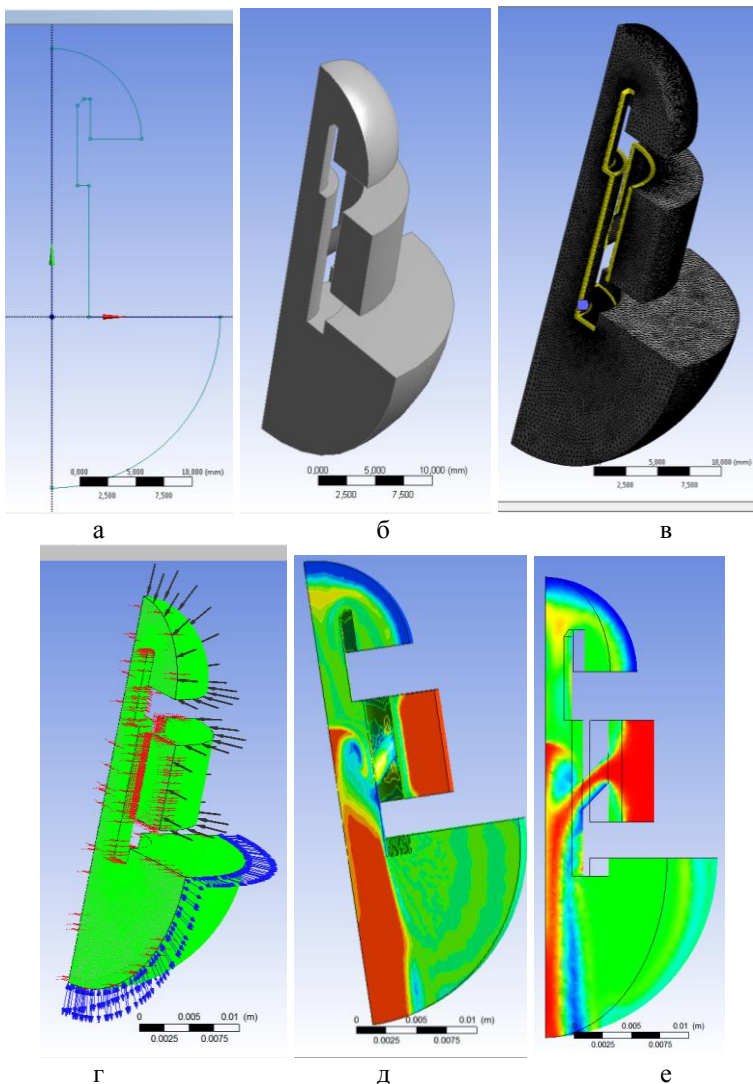


Рисунок 8.4 – Моделирование газо-жидкостной струйно-струйной форсунки с внутренним смешением:

а - эскиз, б - геометрическая модель, в - сеточная модель, г - наложение граничных условий в препроцессоре, д, е - поля концентраций фаз

На рисунке 8.4 представлен порядок моделирования газо-жидкостной струйно-центробежной форсунки с внешним смешением. Поскольку центробежная часть имеет 4 подводящих отверстия, то для моделирования используется 1/4 часть модели. Для формирования более качественной сетки на область стенок внутри форсунки также накладываются более мелкие элементы, чем в основной области (см. рисунок 8.3, в). Результат удобнее отображать в виде половины модели, используя копирование (отзеркаливание) данных (см. рисунок 8.4, д).

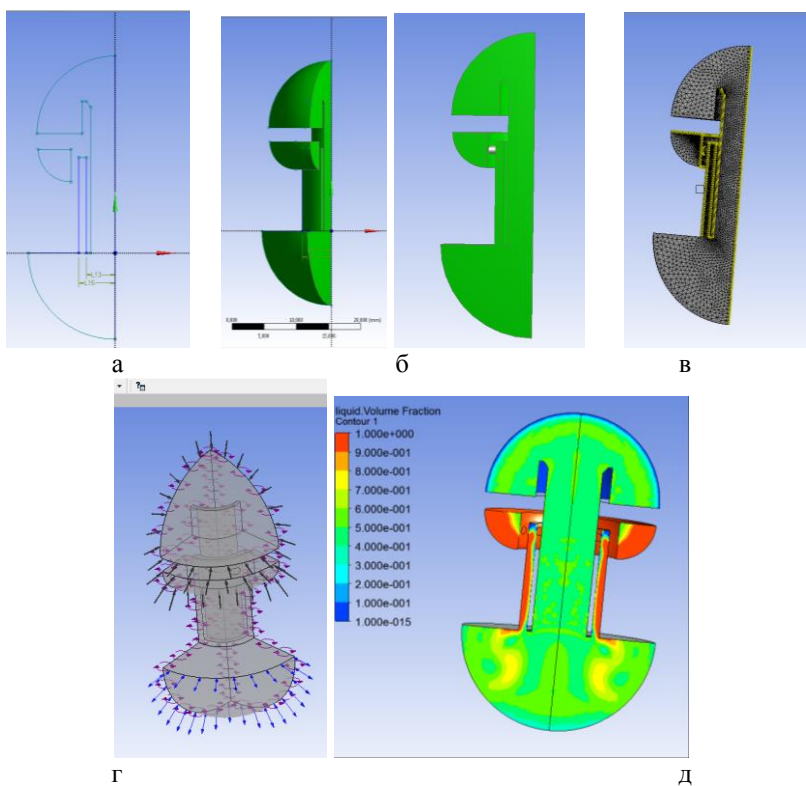


Рисунок 8.4 – Моделирование газо-жидкостной струйно-центробежной форсунки с внутренним смешением:
а - эскиз, б - геометрическая модель, в - сеточная модель, г - наложение граничных условий препроцессоре, д, - поле концентрации жидкой фазы

На рисунках 8.5, 8.6 приведен порядок моделирования газожидкостной, струйно-центробежной форсунки с внутренним смешением. Поскольку центробежная часть имеет 4 подводящих отверстия, то для моделирования также используется секторная модель $1/N$, где N - число подводов. Построение полости центробежного подвода можно выполнять как в виде полного секторного элемента (см. рисунок 8.6, б), так и в виде отдельной полусферы, не выходящей за пределы сектора (рисунок 8.7, а). Последний случай оправдан при малом диаметре подвода, когда область 10-кратной сферы оказывается значительно меньше, чем секторная часть, поэтому её применение даёт снижение вычислительных затрат.

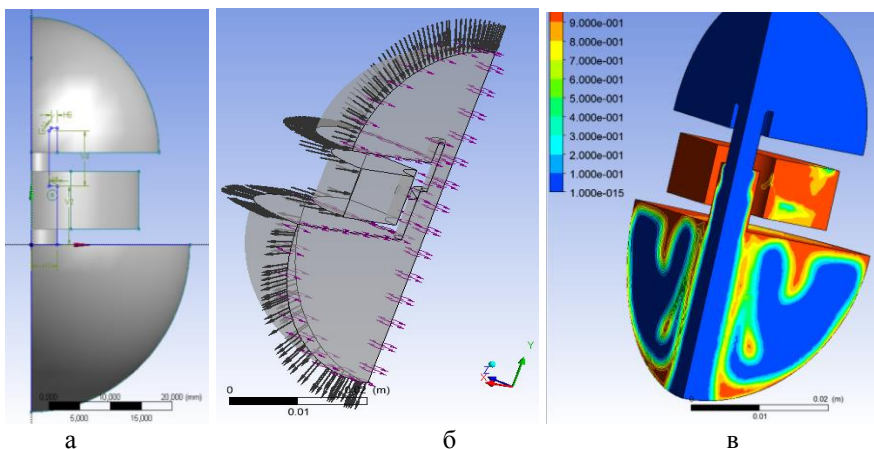


Рисунок 8.6 – Моделирование газожидкостной струйно-центробежной форсунки с внутренним смешением: а - геометрическая модель, б - наложение граничных условий препроцессоре, в - поле концентраций фаз

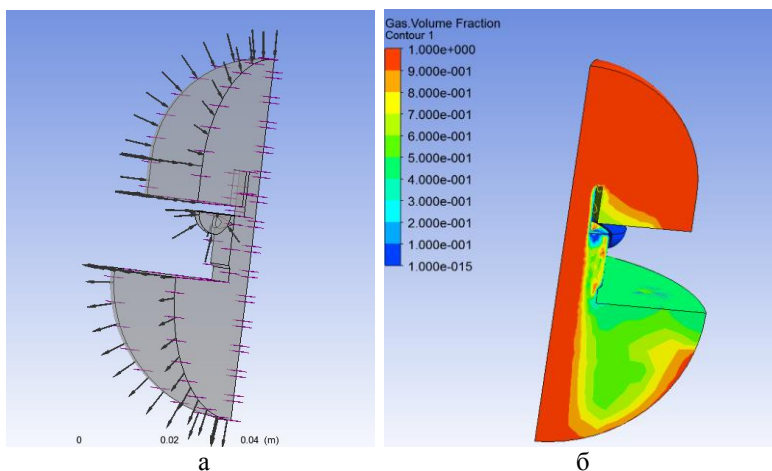


Рисунок 8.7 – Моделирование газожидкостной струйно-центробежной форсунки с внутренним смешением:
 а - геометрическая модель, б - поле концентрации газовой фазы

На рисунке 8.8 приведен порядок моделирования жидкостно-жидкостной центробежно-центробежной форсунки с внешним смешением. Данная модель иллюстрирует пример отсутствия на входных подводах центробежной части сферических элементов. Это оправдано при толстых стенках форсунки и обусловленной этим большой относительной длиной подводящих каналов. В этих условиях фактически не имеет значения, как затекает поток в отверстие подводящего канала, поскольку, продвигаясь по нему, поток приобретает ровное направление. При построении секторной модели центробежно-центробежных форсунок следует сопоставить количества подводов в двух центробежных частях. Так, если например в одной части 4 подвода, а в другой - 2, то секторную модель можно построить только для 1/2, а не для 1/4 полной модели. При этом она будет содержать 2 подвода под 90°.

На рисунке 8.9 приведен порядок моделирования жидкостно-жидкостной центробежно-центробежной форсунки с внутренним смешением. В данной модели подводные тангенциальные отверстия имеют относительную длину менее 2, соответственно для учёта влияния на рабочий форсунки углов затекания в подводные каналы используются сферические элементы.

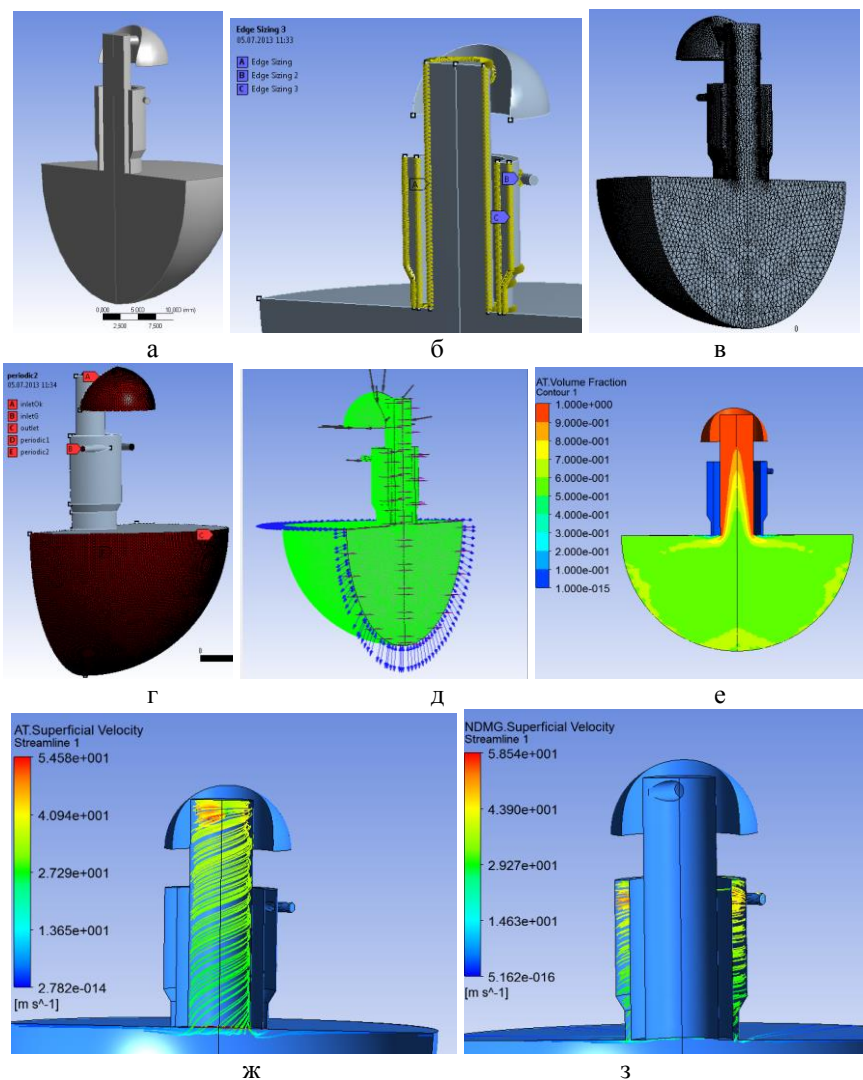


Рисунок 8.8 – Моделирование жидкостно-жидкостной центробежно-центробежной форсунки с внешним смешением: а - геометрическая модель, б - наложение области загушения сетки, в - сеточная модель, г - надписывание областей границ, д - наложение граничных условий препроцессоре, е - поле концентрации окислителя, ж,з - линии тока окислителя и горячего

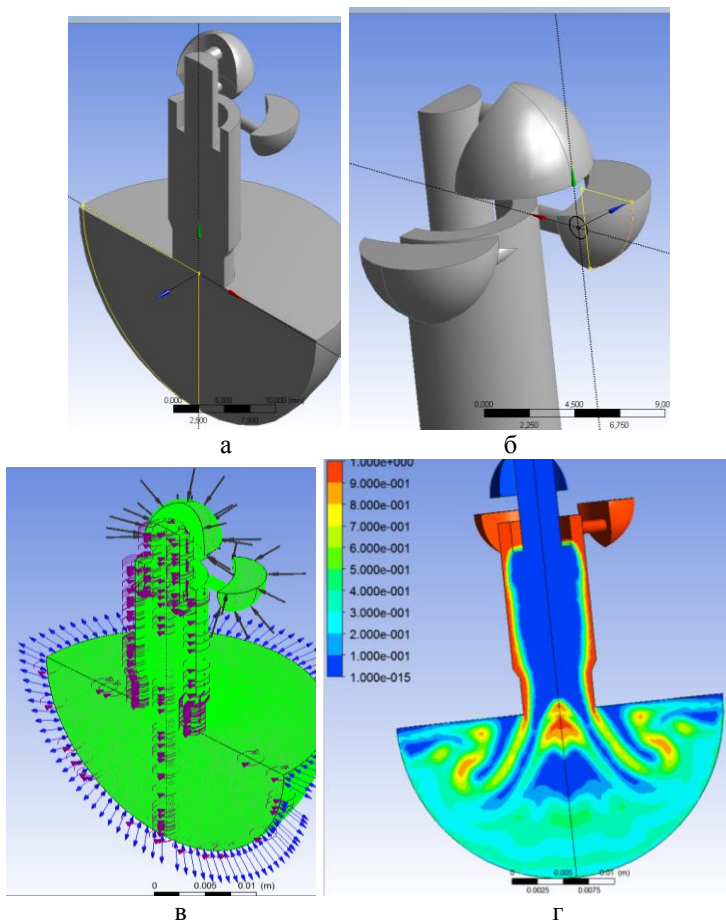


Рисунок 8.9 – Моделирование жидкостно-жидкостной центробежно-центробежной форсунки с внутренним смешением: а - геометрическая модель, б - схема наложения граничных условий препроцессоре, г - поле концентрации компонентов

Как видно из данного раздела, форсунки различных типов могут быть смоделированы с использованием универсальной методики. Тем не менее, каждый тип форсунки имеет свои особенности, что определяет некоторые особенности ее моделирования.

Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.: ил.
2. Шевелюк, М.И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей / М.И. Шевелюк.– М.: Оборонгиз, 1960.
3. Егорычев, В.С. Расчёт и проектирование смесеобразования в жидкостном ракетном двигателе: учеб. пособие / В.С. Егорычев.– Самара: Изд-во СГАУ, 2011.–100 с.: ил.
4. CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX: метод. указания/ сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. - 47 с.: ил.
5. Численное моделирование потоков в водородных шнекоцентробежных насосах турбонасосных агрегатов ЖРД [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост.: А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, В.М. Зубанов. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,6 Мбайт). - Самара, 2013.
6. Формирование численных моделей потоков в предкамерных турбинах турбонасосного агрегата ЖРД в ANSYS CFX [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, Е.А. Никонова, А.В. Кузнецов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,1 Мбайт). - Самара, 2013.
7. Курс «Введение в ANSYS CFX» (ANSYS CFX Introduction) версии 14.5 // сайт технической поддержки компании ANSYS - <https://support.ansys.com/>