

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)» (СГАУ)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ КОМПОНЕНТОВ
ТОПЛИВА В ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКЕ 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 621.458 (075)
ББК 39.65-01я73
Ч 671

Авторы: Ляскин Антон Сергеевич
Костин Алексей Вадимович,
Силютин Максим Владимирович,
Шустов Станислав Алексеевич

Редакторская обработка: С.А.Шустов
Компьютерная верстка: М.В. Силютин
Доверстка: М.В. Силютин

Численное моделирование потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. С. Ляскин и др.; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (9,41 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии изложены методы численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД на основе использования программного комплекса ANSYS FLUENT 14.5

Предназначено для подготовки специалистов по направлению 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» по дисциплинам: «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей», 6 и 7 семестр « Автоматизация проектирования авиационных и ракетных двигателей», 8 семестр, «CALS/PLM – технологии в ракетном двигателестроении» 8 семестр .

Подготовлено на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНОЧНЫХ ГОЛОВКАХ КАМЕР СГОРАНИЯ ЖРД.....	5
1.1 Назначение форсуночных головок и требования к ним.....	5
1.2 Типы форсуночных головок камер ЖРД.....	6
1.3 Основные понятия о процессах смесеобразования в форсуночной головке камеры ЖРД.....	13
2 МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВ В ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКЕ КАМЕРЫ ЖРД.....	21
2.1 Описание форсуночной головки камеры ЖРД НК-33 , выбранной объектом численного моделирования.....	21
2.2 Особенности численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД НК-33.....	24
2.3 Основные этапы численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД.....	26
3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ANSYS FLUENT ПОТОКОВ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА В ПНЕВМОФОРСУНКЕ.....	28
3.1 Постановка задачи.....	28
3.2 Порядок подключения используемых физических моделей.....	31
3.3 Порядок задания граничных условий.....	35
3.4 Формирование процесса численного решения течения газовой фазы без капель.....	40
3.5 Формирование процесса численного решения для двухфазного Течения.....	48
4 ФОРМИРОВАНИЕ В ANSYS FLUENT CFD - МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖРД.....	64
4.1 Создание проекта в среде ANSYS Workbench.....	64
4.2 Формирование геометрической модели.....	65
4.3 Формирование сеточной модели моделируемого объекта.....	68
4.4 Формирование CFD-модели течения газогенераторного газа в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД.....	72
4.5 Формирование процедуры численного решения CFD- модели течения газогенераторного газа в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД.....	78
4.6 Отображение результатов расчета и проверка его адекватности.....	80
5 ФОРМИРОВАНИЕ CFD- МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ В СРЕДЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ЖРД В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH.....	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем учебном пособии излагаются вопросы численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД.

Излагаются требования к форсуночным головкам камеры ЖРД, рассмотрены различные типы форсуночных головок и основные физические процессы в этих головках, связанные со смесеобразованием – распыливание компонентов, испарение капель и процессы диффузии. Показана физическая природа взаимосвязей этих процессов и необходимость их сопряженного моделирования

Изложены основные требования к численному моделированию потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД . Показано, что практическое обеспечение этих требований возможно лишь при использовании современных численных методов, реализованных в компьютерной форме и известных как технологии CFD-моделирования .

Рассмотрены основные этапы CFD-моделирования на основе использования программного комплекса ANSYS FLUENT применительно к численному моделированию потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры с ЖРД – от формирования геометрической модели до получения численного решения моделей рассматриваемых процессов и анализа полученных результатов .

Учебное пособие предназначено для углубленного изучения учебных дисциплин «Теория , расчет и проектирование ракетных двигателей» и «CALS/PLM – технологии в ракетном двигателестроении» студентами факультета двигателей летательных аппаратов СГАУ, обучающимися по специальности 160302.65 .

Учебное пособие может быть использовано также при проведении лабораторных работ по указанным дисциплинам, а также при выполнении курсового и дипломного проектирования студентами , обучающимися по специальности 160302.65 .

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНОЧНЫХ ГОЛОВКАХ КАМЕР СГОРАНИЯ ЖРД

В данном разделе приводятся лишь основные сведения о форсуночных головках камер сгорания ЖРД, необходимые для численного моделирования потоков компонентов топлива в этих головках. Более детальное изложение этих сведений можно найти в учебниках [1,2,3], а также в учебном пособии [4].

1.1 Назначение форсуночных головок и требования к ним

Форсуночная головка является главным узлом камеры ЖРД, обеспечивающим правильную организацию смесеобразования в камере сгорания [2,3]. Поэтому форсуночную головку называют также смесительной головкой [2,3].

Форсуночная головка должна способствовать выполнению основных требований, предъявляемых к смесеобразованию, при обеспечении надежности и технологичности конструкции камеры ЖРД, что, в основном, сводится к следующему:

- 1) возможно более равномерному распределению по сечению камеры сгорания соотношения компонентов K_m и расходонапряженности q_m .
- 2) возможно меньшей склонности к возникновению неустойчивого горения;
- 3) защите стенок камеры сгорания от прогара;
- 4) защите головки камеры сгорания от воздействия высоких тепловых потоков, идущих от фронта пламени;

Практическое обеспечение этих требований является чрезвычайно сложной и ответственной научно-технической проблемой. Одна из основных причин этой сложности заключается в том, что вышеизложенные требования взаимосвязаны.

Так, исследования показали [3], что распределение соотношения компонентов K_m и расходонапряженности компонентов q_m , полученное непосредственно у форсуночной головки, практически сохраняется вдоль всей камеры сгорания и сопла двигателя. В свою очередь, неравномерность распределения K_m и q_m по сечению камеры влияет на удельный импульс двигателя J_y , тепловое состояние стенок камеры и устойчивость процесса горения в камере сгорания.

Качество смесеобразования в форсуночной головке камеры ЖРД зависит прежде всего от типа используемых форсунок и их расположение на форсуночной головке. В свою очередь тип используемых форсунок (струйные или центробежные, однокомпонентные или двухкомпонентные) и их расположение на форсуночной головке зависит от большого числа факторов: вида системы подачи (или вытеснительная или насосная, если насосная, то открытая система подачи или замкнутая), типа компонентов топлива (самовоспламеняющиеся либо нет), физических свойств компонентов топлива (высококипящие или криогенные) и ряда других. Этим объясняется большое количество типов форсуночных головок, обзор которых приводится в следующем разделе

1.2 Типы форсуночных головок камер ЖРД

Основными типами головок являются плоские, шатровые и сферические (рисунок 1.1) [3].

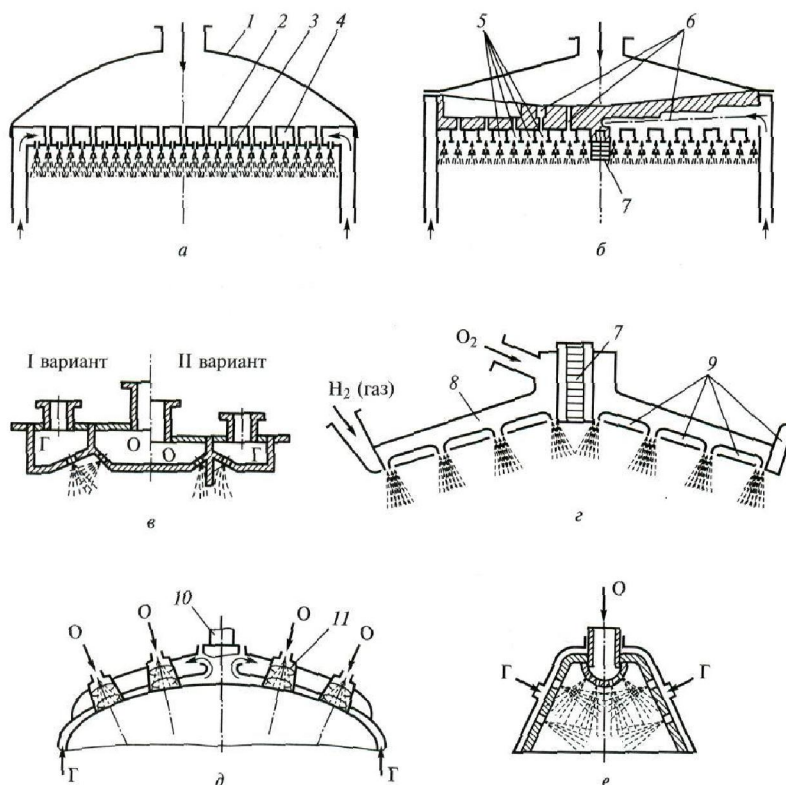


Рисунок 1.1 – Типы форсуночных головок ЖРД :

а - плоская с двойным дном; *б* - плоская со сверлениями; *в* - плоская с пересекающимися струями окислителя и горючего; *г* - сферическая; *д* - сферическая с форкамерами; *е* - шатровая с центральным подводом окислителя;

1 - верхнее днище; *2* - среднее днище; *3* - нижнее днище; *4* - полость охладителя; *5* - кольцевые коллекторы; *6* - каналы сверления; *7* - запальник; *8* - полость Ог; *9* - кольцевые полости H₂; *10* - клапан; *11* - форкамеры

Плоские головки (рис. 1.1, а, б, в) являются наиболее распространенным типом.

Преимущество плоских головок — в простоте конструкции; кроме того, плоские

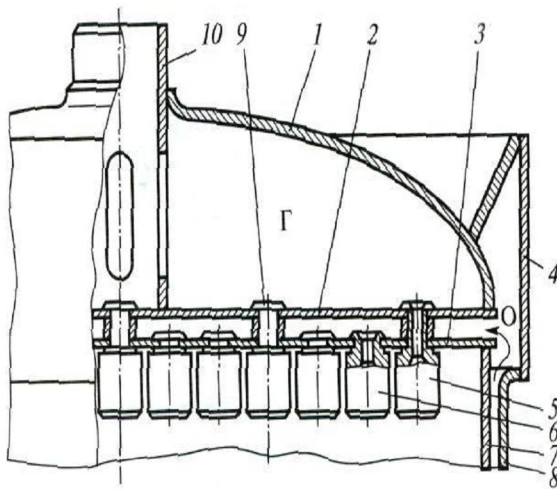


Рисунок 1.2 – Конструкция плоской форсуночной головки ЖРД

- 1-верхнее днище; 2-среднее днище; 3-нижнее днище;
4-соединительное кольцо; 5-форсунки горючего;
6-форсунки окислителя; 7-внутренняя оболочка сгорания; 8-корпус камеры; 9-входная трубка; 10-трубка

головки позволяют достаточно хорошо обеспечить однородность поля скоростей и концентраций топлива по поперечному сечению камеры сгорания. Недостатком плоских головок является относительно небольшая прочность и малая жесткость. Поэтому в плоских головках крупногабаритных двигателей необходимо предусматривать подкрепляющие элементы, обеспечивающие требуемую

прочность и жесткость головки. На рисунке 1.2 показана плоская головка с однокомпонентными форсунками, работающая по схеме, приведенной на рис. 1.1, а. Охладитель О поступает из охлаждающего тракта в полость между средним 2 и внутренним 3 днищами головки, откуда через шнековые форсунки 6 поступает в камеру сгорания. Компонент Г через входную трубку 10 поступает в полость между наружным 1 и средним 2 днищами, а оттуда через шнековые форсунки 5 — в камеру сгорания. Форсунки крепятся развальцовкой. Головка соединяется с камерой сгорания при помощи соединительного кольца 4, а также непосредственно сваркой с внутренней оболочкой 7 камеры сгорания.

На рис. 1.3 показан внешний вид плоской форсуночной головки с двухкомпонентными центробежными форсунками.



Рисунок 1.3- Плоская головка с двухкомпонентными центробежными форсунками

Сферические форсуночные головки нашли применение преимущественно в двигателях больших тяг. Достоинством таких форсуночных головок является высокая жесткость конструкции.

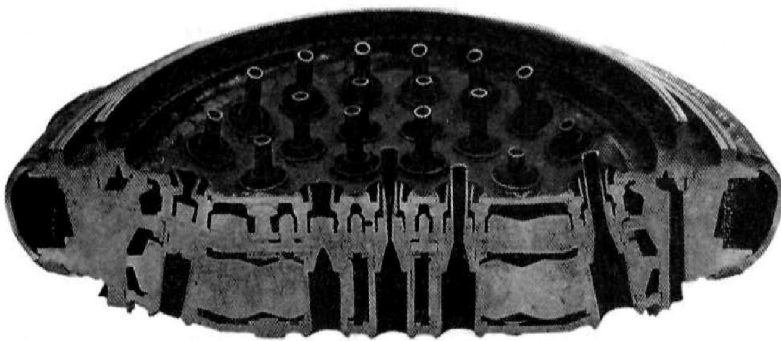


Рис.1.4 -Сферическая форсуночная головка ЖРД со струйно-центробежными форсунками

На рис. 1.1, 2 и 1.4 показаны схема и внешний вид сферической головки, оснащенной двухкомпонентными форсунками с внешним смешением.

Размещение форсунок на головке должно способствовать выполнению перечисленных в раздел 1.1 требований. В связи с этим на рисунке 1.5 показаны

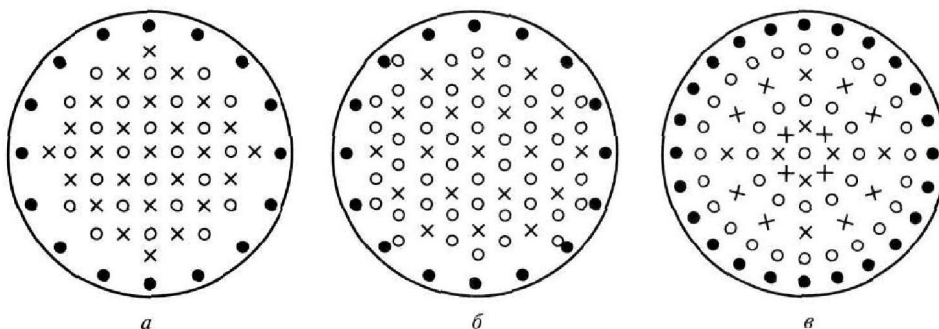


Рисунок 1.5 - Схемы расположения форсунок:

а - шахматное; б - сотовое; в - концентрическое; х - форсунки горючего; о - форсунки окислителя; - форсунки горючего для создания пристеночного слоя

основные схемы размещения форсунок [3,3]

В ЖРД , работающих на однокомпонентных форсунках, для обеспечения хорошего смесе-

образования необходимо равномерное чередование форсунок горючего и

окислителя. Поэтому можно выделить следующие основные схемы расположения форсунок горючего и окислителя на головке двигателя.

Шахматное расположение, когда форсунки горючего и окислителя располагаются в шахматном порядке, чередуясь между собой (рис 1.5, а). Недостаток этого способа состоит в том, что число форсунок горючего получается примерно равным числу форсунок окислителя. Поскольку весовой расход окислителя обычно в 2- 4 раза больше, чем горючего, то при таком расположении расход каждой форсунки окислителя значительно больше расхода форсунки горючего, что может ухудшить смесеобразование, так как мощная струя окислителя плохо смешивается с относительно слабой струей горючего, сбивая ее в сторону.

Сотовое расположение (рисунок 1.5, б), при котором каждая форсунка горючего окружена группой окислительных форсунок, позволяет иметь большее число форсунок окислителя, чем горючего. При этом разница в расходах форсунок окислителя и горючего меньше, чем при шахматном расположении, что обеспечивает лучшее распыление и смешивание компонентов топлива.

Концентрическое расположение, при котором пояса форсунок горючего и окислителя чередуются (рисунок 1.5, в), в некоторых конструкциях упрощает подвод компонентов к форсункам. Примером расположения форсунок по концентрическим окружностям может служить головка кислородно-водородного двигателя (см. рис. 1.1, г). Здесь в концентрических поясах размещены группы форсунок, состоящие из двух форсунок горючего (H_2) и одной — окислителя (Oг).

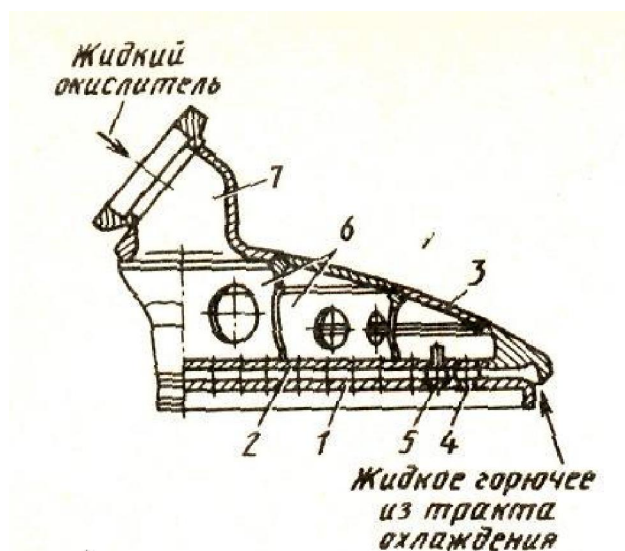
Двухкомпонентные форсунки могут быть размещены по любой схеме, необходимо только учитывать возможность возникновения неустойчивого горения, а также защиту головки от прогара.

Для обеспечения условий, наименее способствующих возникновению неустойчивого горения, как одно -, так и двухкомпонентные форсунки иногда размещают в порядке, представляющем собой различные комбинации приведенных выше схем расположения форсунок, а также стремятся несколько растянуть процесс горения по длине камеры сгорания. В конце камеры желательно существование гетерогенной зоны, которая демпфирует, насколько это возможно, продольную

высокочастотную неустойчивость горения. Это достигается определенным чередованием форсунок с различными расходами и углами распыления (т. е. дальностью).

Для защиты стенок камеры сгорания от прогара создается защитный пристеночный слой с избытком горючего, имеющий вследствие этого более низкую температуру, чем ядро потока. Следует отметить, что пристеночный слой с большим избытком окислителя также имел бы температуру ниже температуры ядра потока и, по-видимому, являлся бы вполне удовлетворительным защитным слоем, однако опасность возникновения местных очагов горения у стенки в окислительной среде и прогара стенок вследствие окисления металла приводит к тому, что обычно создается пристеночный слой, обогащенный горючим. Для этого на головке либо устанавливается специальный периферийный пояс форсунок горючего, как показано на рис. 1.5, либо крайние форсунки окислителя заменяются форсунками горючего.

Реализация изложенных выше принципов конструирования форсуночных головок на примере конкретных ЖРД показана на рисунках 1.6....1.8



1-переднее (огневое) днище; 2-среднее днище; 3-наружное днище; 4,5-однокомпонентная и двухкомпонентная форсунки; 6-внутренние перегородки; 7-патрубок

Рисунок 1.6- Форсуночная головка камеры ЖРД РД-107

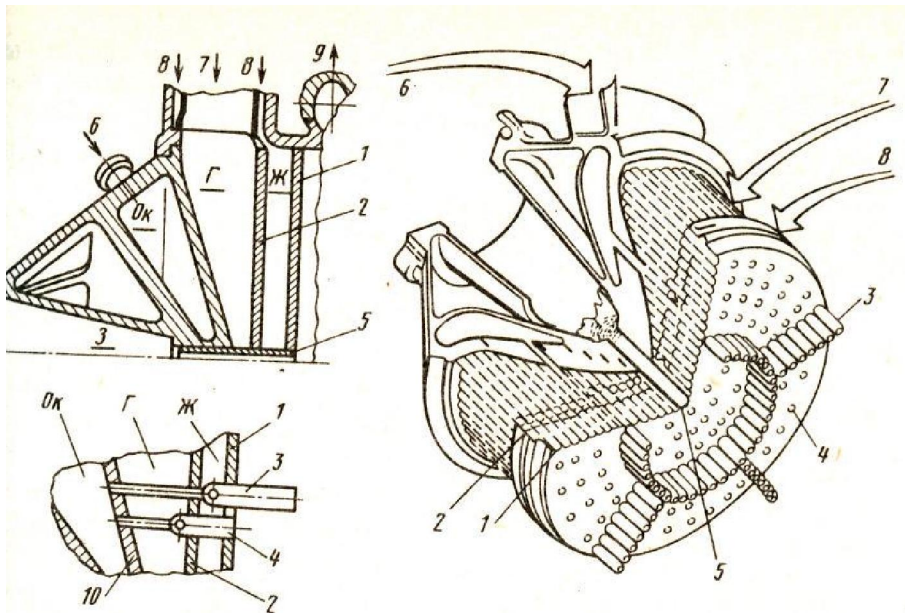
Схема типичного блока форсуночной головки показана на рисунке 1.6- эта головка кислородно - углеводородного ЖРД РД-107/108 х (используется в составе первой и второй ступеней ракеты-носителя «Союз»).

Эта конструкция форсуночной головки является классической для ЖРД, работающих по открытой схеме без

дожиганием генераторного газа.

Блок состоит из трех днищ - переднего, или огневого, среднего и наружного. Днища образуют две основные полости головки: внутреннюю, в которую поступает горючее непосредственно из охлаждающего тракта, и наружную полость окислителя. К корпусу головки присоединены днища (здесь только среднее и наружное, но в других конструкциях все днища могут соединяться с корпусом головки) ; внутренние перегородки или перемычки соединены со средним и наружным днищами; имеется патрубок, через который подводится окислитель, и набор форсунок, соединенных с огневым и средним днищами. Благодаря соединениям форсунок и перегородок с днищами конструкция головки приобретает большую жесткость и прочность, способность выдерживать большие давления в полостях и в камере сгорания.

На рисунке 1.7 показаны фрагменты смесительной головки кислородно-водородного



1- переднее днище; 2 - промежуточное днище; 3 - форсунки, образующие анти-пульсационные перегородки; 4 - основные форсунки; 5 - канал для блока зажигания; 6 - подвод окислителя; 7 - подвод газа от турбин; 8 - водород, охлаждающий газоды; 9 - отвод охладителя из тракта камеры; 10 - наружное днище; полости: Ок - окислителя; Г - газа с избытком водорода; Ж - водорода; 3 - полость для установки блока электроискрового зажигания

двигателя SSME тягой 1670 кН [Гахун] (используется в качестве маршевого ЖРД на орбитальном самолете «Спейс Шаттл» [Уманский, с.141]). На головке установлено 600 двухкомпонентных струйных форсунок,

выполненных в виде двух соосно-коаксиально расположенных трубок. По

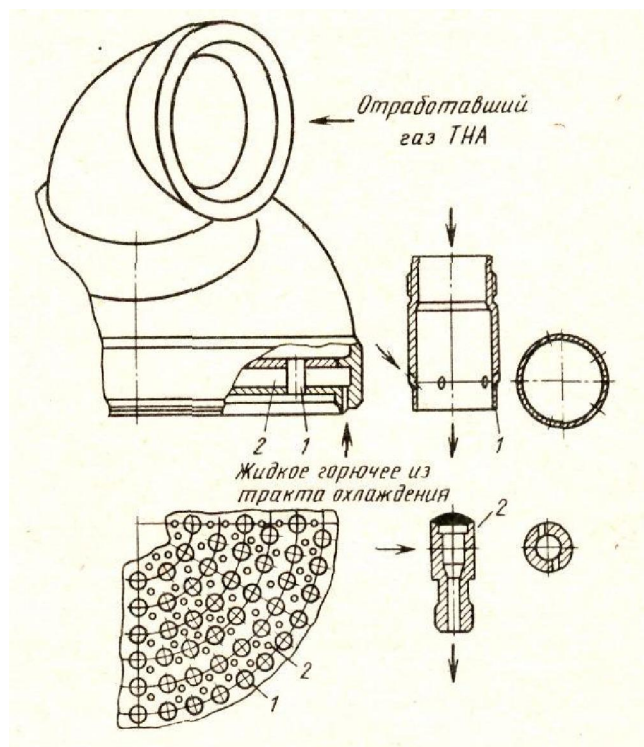
внутренним трубкам, соединенным с внешней полостью головки *Ок*, поступает жидкий кислород. По наружным трубкам, большинство которых соединено с полостью головки *Г*, поступает отработанный на турбинах ТНА восстановительный генераторный газ. Через последний периферийный ряд форсунок горючего (75 шт.), соединенных с полостью головки *Ж*, поступает "чистый" водород из охлаждающего тракта газоведа.

Форсунки на головке располагаются по 13 концентрическим окружностям. Часть форсунок выступает из огневого днища, образуя антипульсационные перегородки в виде кольца с пятью расходящимися радиальными лучами. Кроме того, в передней части камеры устроена акустическая полость. Все вместе взятое обеспечивает устойчивую работу камеры на всех режимах.

Интересной особенностью конструкции головки являются днища 1 и 2, выполненные из пористых материалов, которые получены из прессованной сетки с последующим ее спеканием. Через поры днищ "чистый" водород со сравнительно низкой температурой (порядка 300 К) из полости *Ж* под давлением проникает с одной стороны в камеру сгорания, а с другой стороны в полость *Г* с горячим генераторным газом. Этим самым обеспечивается достаточно надежное охлаждение обоих днищ. Форсунки соединены с днищами сваркой трением.

В центре смесительной головки устроен канал, в который с внешней стороны устанавливается блок электроискрового зажигания, от которого в камеру сгорания направляется пусковой факел из форкамеры блока.

На рисунке 1.8 приведена схема конструкций форсуночной головки и форсунок камеры ЖРД РД-253, работающего на самовоспламеняющихся



- 1 - газожидкостная двухкомпонентная струйно-струйная форсунка; 2 - жидкостная однокомпонентная центробежная форсунка

Рисунок 1.8 – Форсуночная головка камеры ЖРД РД-253

компонентах четырехокись азота и несимметричный диметилгидразин по замкнутой схеме с дожиганием окислительного генераторного газа (используется на первой ступени ракеты-носителя «Протон») Основные форсунки расположены на семи концентрических окружностях равномерно (169 шт.). Для защиты огневого днища между основными форсунками установлены малорасходные форсунки горючего. Конструктивная

схема головки сравнительно простая: охлаждающий компонент - горючее — непосредственно из охлаждающего тракта поступает во внутреннюю полость головки, а отработанный на турбине ТНА окислительный генераторный газ по газоводу через установленную в нем решетку для выравнивания по сечению поля полного давления — в торец головки.

1.3 Основные понятия о процессах смесеобразования в форсуночной головке камеры ЖРД

1.3.1 Основные зоны смесеобразования

Смесеобразованием называется комплекс процессов, протекающих от момента ввода в камеру компонентов топлива до образования однородной смеси [3]. Таким

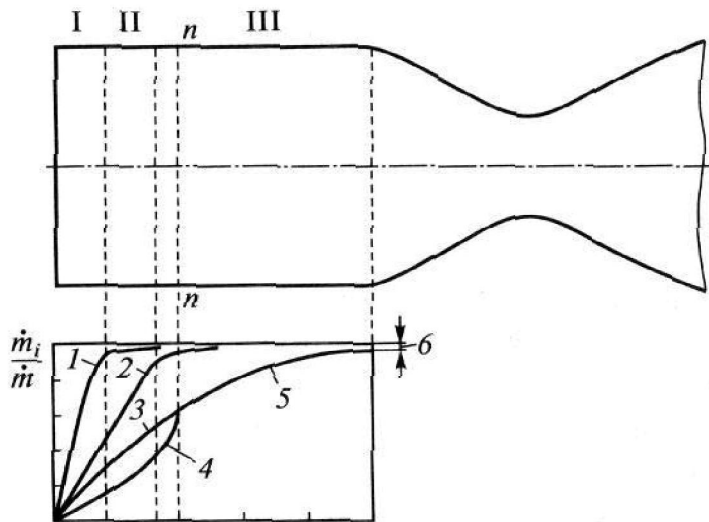


Рисунок 1.9 – Схема протекания процессов в камере сгорания ЖРД

образом, процесс смесеобразования складывается из подачи компонентов в камеру через форсунки, дробления струй на капли, испарения и перемешивания.

Преобразованием топлива в продукты сгорания называется суммарный процесс, состоящий из процессов смесеобразования и горения топлива [3]

В соответствии с протеканием рабочих процессов, определяющих процесс преобразования компонентов топлива в высокотемпературные продукты сгорания, камеру сгорания ЖРД принято разбивать по длине на следующие основные зоны (рисунок 1.9) [3,6]:

- I — зона распыления,
- II — зона испарения,
- III — зона смешения
- IV — зона горения.

Здесь m_i / m — степень завершенности

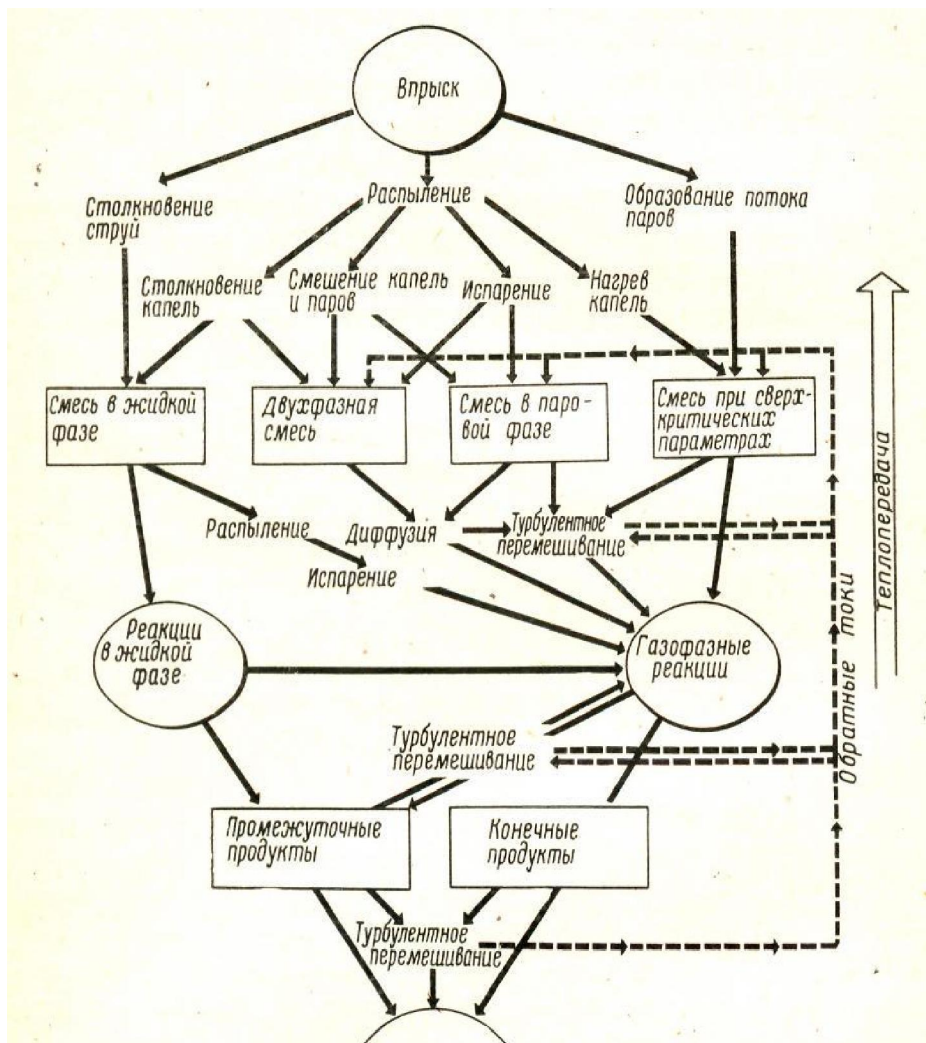


Рисунок 1.10 – Схема потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД

элементарного процесса преобразования топлива в продукты сгорания.

В [3,6] отмечается, что деление камеры сгорания на указанные зоны несколько условно, так как процессы распыления, испарения, смешения и горения не идут в строгой последовательности, и нельзя сказать, что только после полного распыления начинается испарение, а после испарения — смешение и т. д. В элементарном объеме камеры сгорания могут одновременно протекать два или три элементарных процесса. При этом вследствие больших скоростей протекания химических реакций в зоне горения лимитирующими являются процессы в зонах I, II и III, т.е. процессы смесеобразования. С учетом вышеизложенного выделим область моделирования рабочих процессов в форсуночной головке ЖРД, соответствующую процессам смесеобразования: ее протяженность в осевом направлении ограничена плоскостью огневого днища и фронтом пламени, а в поперечном направлении границей эта область ограничена цилиндрической стенкой камеры сгорания.

Схема потоков компонентов топлива в этой области показана на рисунке 1.10 [6]. В соответствии с этой схемой потоки компонентов в форсуночной головке находятся в жидкой фазе (в виде жидких струй, плен и капель), а также в виде паров компонентов и продуктов, причем в процессе движения этих компонентов к фронту пламени происходит распыл компонентов топлива и превращение их в совокупность капель, прогрев и испарение этих капель, а также диффузия паров компонентов. Таким образом, физическая картина процессов смесеобразования в камерах сгорания ЖРД является чрезвычайно сложной, ее рассмотрению посвящен ряд учебников и монографий [1,3,5,6,7]. Ниже изложены лишь основные сведения о физических процессах распыливания компонентов, испарения капель и диффузии паров компонентов, необходимые для постановки задачи численного моделирования.

1.3.2 Распыление компонентов

Основными показателями, характеризующими качество распыления, являются тонкость и однородность распыления, а также дальнобойность струи и распределение расходонапряженности по ее сечению.

Качество распыления топлива, поступающего в камеру, определяет протекание в камере дальнейших процессов — испарения, смешения и горения топлива. На качество распыления влияют процессы, протекающие как в топливоподающей системе и форсунках, так и в камере сгорания. Тип форсунок (струйные или центробежные, двухкомпонентные по схеме «газ-жидкость» или «жидкость-жидкость»), конструкция и взаимное расположение их в значительной мере предопределяют процесс распыления топлива.

Распад струи на капли и дробление капель происходят на выходе струи из форсунок под действием внешних и внутренних сил.

К *внешним* силам (иногда их называют *аэродинамическими*) относятся силы взаимодействия компонента со средой, в которую он впрыскивается. Величина этих сил зависит от вязкости и плотности окружающей среды, скорости струи и размеров капель жидкости. К *внешним* силам относятся также силы взаимодействия при пересечении струй или при встрече струи с твердой стенкой. При увеличении скорости движения струи относительно среды, в которую происходит впрыск, действие внешних сил растёт, при этом растёт возмущение поверхности струи, что приводит к быстрейшему дроблению струи, а следовательно, и улучшению качества распыления. Однако распад и дробление струи могут происходить и при отсутствии внешних сил. Так, например, при впрыске компонента в вакуум распыление происходит под действием внутренних сил.

К *внутренним* силам относятся действие турбулентности и молекулярные силы. В струе компонента, вытекающего из форсунки, возникают турбулентные пульсации скорости; внутри струи молекулы жидкости совершают беспорядочные движения. Интенсивность турбулентности зависит от перепада давления на форсунке, плотности, вязкости компонента, а также от конструкции форсунки. Увеличение перепада давления (т. е. увеличение скорости истечения) способствует увеличению интенсивности турбулентности, вследствие чего ускоряется дробление струи, т. е. улучшается качество распыления. Молекулярные силы — это силы вязкости и поверхностного натяжения.

При выходе струи из форсунки внешние силы и турбулентные пульсации скорости внутри струи стремятся раздробить струю (пелену); с другой стороны, силы поверхностного натяжения и силы вязкости препятствуют дроблению. При этом дробление струи и образование капель происходят следующим образом.

При впрыске компонента через форсунку образуется жидкая струя (пелена). Под действием внешних сил и турбулентных пульсаций в струе появляется возмущение на поверхности жидкости. В результате дальнейшего действия на компонент внешних и внутренних сил образуется пленка жидкости и струя (пелена) распадается на частицы различной величины и формы. Малые частицы под действием поверхностного натяжения принимают форму шара и образуют капли; крупные — продолжают распадаться дальше (рисунок 1.11).

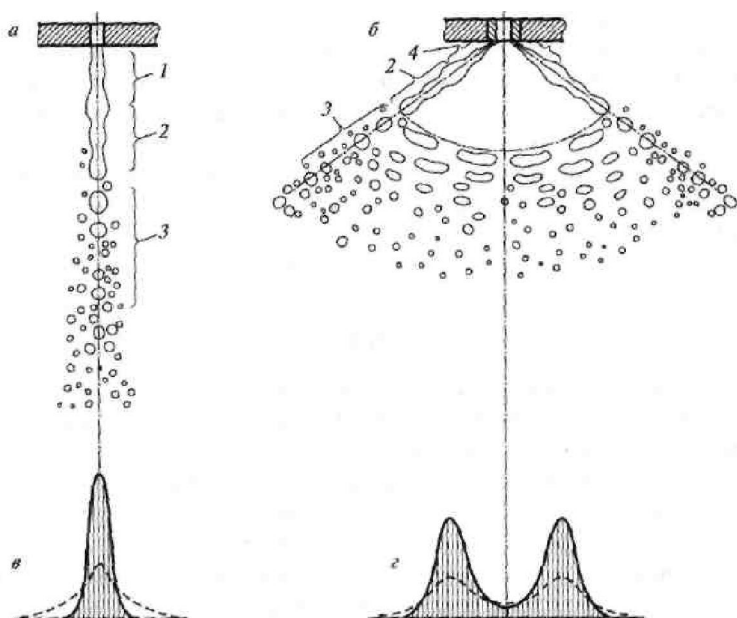
Тонкость распыления характеризуется величиной среднего диаметра образующихся капель.

Однородность

распыления

характеризуется кривой распределения капель данного диаметра.

Тонкость и однородность распыления зависят от свойств компонента, конструкции форсунки, а также от параметров работы камеры сгорания, в которую производится впрыск, и, в первую очередь, от плотности



а — струйная форсунка; б — центробежная форсунка;
в, г — эпюры распределения расхода напряженности;
1 — струя; 2 — возмущение поверхности
и образование перемычек; 3 — дробление
струй (пелены) на части; 4 — пелена

Рисунок 1.10- Механизм распада струи (пелены)

продуктов сгорания. С увеличением плотности среды, в которую производится впрыск, а также с увеличением перепада давления на форсунке тонкость распыления

увеличивается. Для ЖРД средний диаметр капли находится в пределах 25...250 мкм. Интересно отметить, что для дизеля, имеющего значительно больший перепад давления на форсунке, средний диаметр капли меньше и находится в пределах 10...100 мкм. Основная причина этого заключается в том, что в дизелях устанавливаются форсунки со значительно большим перепадом давления $\Delta_{p,ф}$, чем в ЖРД.

Дальнобойность струи (или *глубина проникновения*) определяется скоростью выхода струи из форсунки (т. е. перепадом давления на форсунке), направлением и углом распыления, а также плотностью среды, в которой происходит распыление компонентов. Увеличение дальнобойности струи нежелательно, так как увеличиваются размеры зоны распыления, а следовательно, и размеры камеры сгорания.

Распределение *расходонапряженности* компонента по поперечному сечению струи определяется, в первую очередь, типом форсунки.

Типичные эпюры распределения расходонапряженности для струйной и центробежной форсунки приведены на рисунке 1.11, *в*, *г*. Для струйной форсунки типичным является пик расходонапряженности на оси форсунки. Для сечения струи центробежной форсунки характерно наличие двух пиков на некотором расстоянии от оси.

По мере удаления струи от сопла форсунки происходит некоторое сглаживание пиков (пунктирная линия на рисунке 1.10, *в*, *г*). Обычно полагается, что расходонапряженность по окружности струи постоянна, хотя в действительности расходонапряженность неравномерна.

1.3.3 Испарение компонентов топлива

Процесс испарения является важным этапом подготовки топлива к воспламенению и горению, так как основное количество топлива в камере ЖРД воспламеняется и горит в газовой фазе. От скорости протекания процесса испарения сильно зависит и полное время, за которое происходит образование продуктов сгорания. Сложность процесса испарения в камере ЖРД усугубляется тем, что здесь

происходит одновременное испарение не одного компонента, а сложной смеси компонентов с различными физико-химическими свойствами. При этом процесс испарения должен закончиться за очень малый промежуток времени порядка 0,002...0,008 с. Тепло, необходимое для испарения капель в камере ЖРД, подводится из зоны горения в первую очередь путем конвективной теплоотдачи от обратных токов горячих газов. Часть тепла подводится к каплям за счет радиационного теплообмена от ядра пламени. Кроме того, подвод тепла происходит также за счет горения, начинающегося в зоне испарения.

Скорость нагрева и испарения капель, а следовательно, и длина зоны испарения зависят от температуры окружающей среды, размера капель, величины относительной (к потоку газов) скорости движения капель, а также от химических и теплофизических свойств вещества капли и газовой фазы. Повышение температуры среды ускоряет процесс испарения; повышение давления, наоборот, несколько замедляет его. Уменьшение размера капли и увеличение относительной скорости движения капли приводит к ускорению испарения.

Выше было рассмотрено влияние различных факторов на испарение отдельной капли. В процессе испарения в камере сгорания ЖРД, как указывалось, имеет место одновременное испарение многокомпонентной смеси капель разных размеров. При этом процесс испарения существенно осложняется по сравнению с процессом испарения единичных капель. Неравномерность распыления приводит в начале испарения к образованию большого количества паров за счет быстрого испарения мелких капель. Однако дальнейшее испарение оставшихся более крупных капель затягивается, и, в целом, полное время испарения смеси капель различного размера больше, чем время испарения совокупности капель среднего размера. Чем больше неравномерность распыления, тем больше увеличивается полное время испарения смеси капель.

При испарении капель многокомпонентных жидкостей, например растворов, что часто имеет место в ЖРД, по мере испарения в капле повышается концентрация более высококипящего компонента, что опять-таки может привести к затягиванию процесса испарения.

Кроме неравномерности распыления и наличия многокомпонентных капель жидкости, на скорость протекания процесса испарения топлива при применении самовоспламеняющихся топлив влияет также наличие реакций в жидкой фазе, возникающих в зоне испарения. Выделяющееся при этом тепло может значительно ускорить процесс испарения.

1.3.4 Диффузия компонентов топлива в газовой фазе

В результате распыления и испарения образуются пары горючего и окислителя, из которых и получается горючая смесь. Смешение горючего и окислителя происходит как в жидкой, так и в паровой фазе. Наиболее желательный, но и очень трудно реализуемый в ЖРД способ смешения — образование однокомпонентного топлива или эмульсии путем полного предварительного смешения компонентов в жидкой фазе еще до поступления их в камеру сгорания. Для ЖРД характерным является смешение компонентов в самой камере сгорания, хотя сам процесс смешения может начинаться в двухкомпонентных форсунках с внутренним смешением. Интенсивность смешения компонентов в камере сгорания определяется в основном турбулентной диффузией и конвективным переносом.

Процесс смешения топливных компонентов в камере ЖРД начинается непосредственно с момента поступления их в камеру сгорания и заканчивается только по мере сгорания топлива. В зонах распыления и испарения происходит смешение части компонентов как в жидкой, так и в газовой фазе. За счет протекания химических реакций непосредственно в жидкой фазе (при самовоспламеняющихся компонентах), а также за счет интенсивного подвода тепла от фронта пламени (что также приводит к возникновению первых очагов горения еще в зоне испарения) процесс смешения в этих зонах значительно интенсифицируется. Однако вследствие неравномерности распыления и различной скорости испарения компонентов процесс смешения не заканчивается в этих зонах, а продолжается и дальше — в зоне смешения и горения. Следовательно, часть топлива поступает в эту зону после испарения и смешения в виде полностью подготовленной к сгоранию рабочей смеси, в которой уже частично начались химические реакции. При горении этой части топлива и начинается образование фронта пламени.

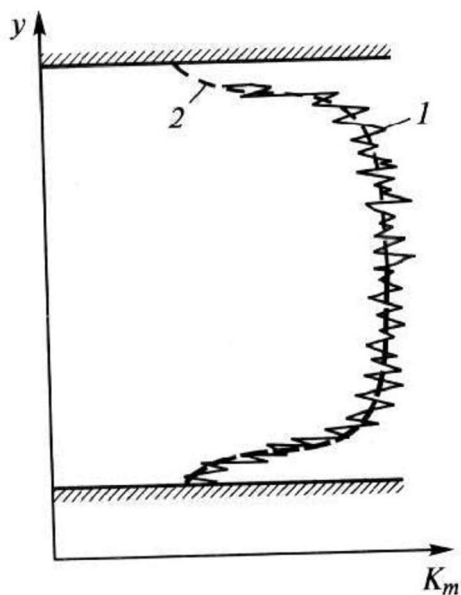


Рисунок 1.12 Профиль распределения соотношения компонентов по сечению камеры ЖРД :

- 1- без учета сглаживания пиков;
- 2 - осредненные значения K_m

ЖРД.

В результате процессов распыливания компонентов, испарения капель и диффузии формируется поле концентраций, которое с инженерной точки зрения удобно представить в виде профиля распределения соотношения компонентов по сечению камеры сгорания ЖРД (рисунок 1.12).

Рассмотренные в данном разделе физические процессы позволяют перейти к рассмотрению технологии численного моделирования процессов смесеобразования в камере сгорания

2 Методика численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД

2.1 Описание форсуночной головки камеры ЖРД НК-33 , выбранной объектом численного моделирования

В разделе 1 отмечалось, что процессы смесеобразования в форсуночной головке существенно зависят от типа компонентов и конструктивной схемы ЖРД (с дожиганием или без дожигания генераторного газа). В настоящее время наиболее перспективными являются ЖРД на экологически чистых компонентах топлива с дожиганием генераторного газа при умеренных давлениях в камере сгорания (около 15 МПа). Классическим примером такого ракетного двигателя является ЖРД НК-33 «Кузнецов» , процессы смесеобразования в форсуночной головке которого выбраны в качестве объекта моделирования в данном учебном пособии. Этот ЖРД был разработан в ОАО «Кузнецов» (г. Самара) под руководством академика Н.Д. Кузнецова в рамках «лунного» проекта , руководителем которого был академик С.П. Королев. В настоящее время модифицированных двигатели НК-33 используются для создания перспективных ракет-носителей легкого класса как в нашей стране (ракета-носитель Союз-1В, разработчик ЦСКБ-Прогресс, г. Самара), так и за рубежом (ракета-носитель Antares, разработчик компания Orbital Sciences Corporation , США)

Пневмогидравлическая схема ЖРД НК-33 приведена на рисунке 2.1 .

Двигатель содержит камеру сгорания 1, подключенную, соответственно, по линиям питания горючим и окислительным газом к турбонасосному агрегату 2 и к газогенератору 3. ТНА выполнен однороторным. Конструктивно ТНА состоит из двух основных составных частей: турбины 4 с насосом окислителя 5 и основного насоса горючего 6 с пусковой пиротурбиной 7. Каждая часть содержит свой вал, а именно вал насоса окислителя 8 и вал основного насоса горючего 9, соединенные рессорой 10. Со стороны подвода горючего 11 к валу 9 основного насоса горючего через шестеренчатый мультипликатор 12 механически подключен дополнительный (дожимной) насос горючего 13. Гидравлически же вход 14 дополнительного насоса подключен к выходу 15 основного насоса горючего, а

выход его через линию питания горючим 16, регулятор тяги 17 и отсечной клапан

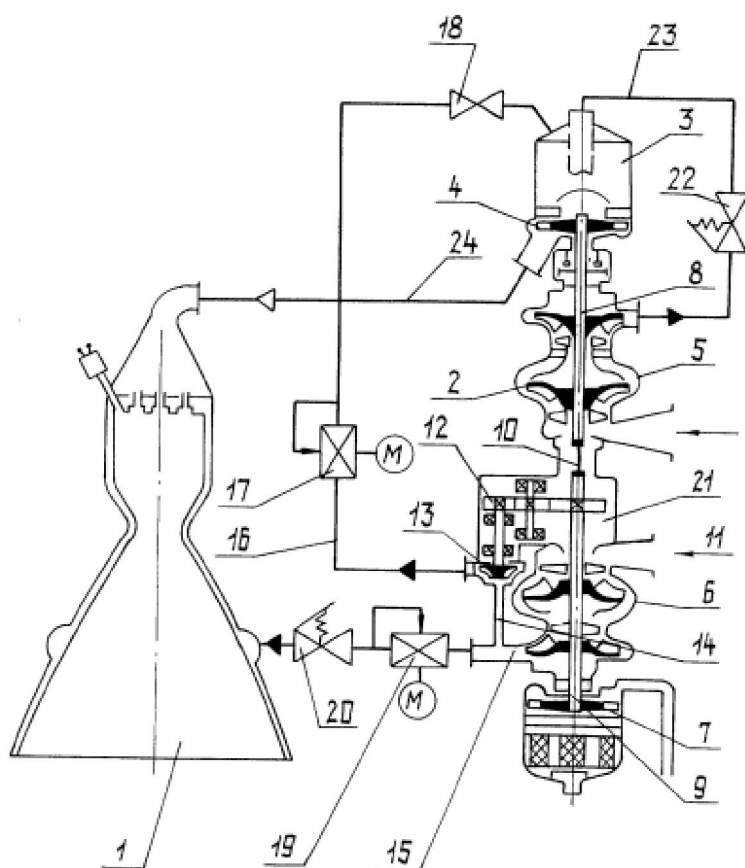


Рисунок 2.1- Пневмогидравлическая схема ЖРД НК-33

18 подключен к двухкомпонентному газогенератору 3. Выход 15 подключен через регулятор соотношения компонентов 19 и клапан 20 с трактом охлаждения камеры сгорания 1. Внутренняя полость корпуса 21 мультипликатора с размещенными в ней шестеренками гидравлически подключена ко входу основного насоса горючего 6. Выход насоса окислителя через клапан

22 подключен к газогенератору 3 по линии 23, а выход из газогенератора - к головке камеры сгорания 1 по линии 27.

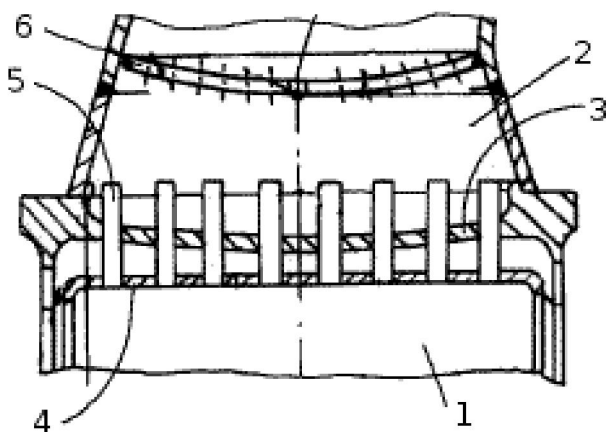
В процессе работы ЖРД и при его запуске весь расход окислителя подается из насоса по линии 23 на окислительный газогенератор 3. Одновременно горючее подается с выхода 15 из основного насоса горючего 6 на камеру сгорания 1 и на вход 14 дополнительного насоса 13. Получив в нем дополнительный напор на больших оборотах с большим кпд, горючее по линии 16 попадает на сгорание в газогенератор 3.

Пуск двигателя осуществляется с помощью пусковой турбины 7, находящейся на противоположном от основной турбины 4 конце вала ТНА и работающей от специальной пирошашки с отводом отработанных газов на срез сопла с помощью выхлопного патрубка. Сразу после начала раскрутки ротора

ТНА пусковой турбиной автоматом запуска открываются клапаны 20, 22 и 18. Кислород и горючее начинают поступать в газогенератор 3, где происходит их зажигание при помощи пиросвечи. Горючее из основного насоса через открытый клапан 20 поступает в в тракт охлаждения камеры сгорания 1, и через определенное время достигает смесительной головки камеры. В течение этого времени задержки, в газогенераторе успевает начаться процесс горения и вырабатываемый генераторный газ раскручивает основную турбину 4 ТНА. После турбины окислительный газ поступает по газоводу 27 в смесительную головку камеры сгорания, где воспламеняется с горючим при помощи трех пиросвечей.

Открытием клапанов и зажиганием управляет специальный автомат запуска, обеспечивающий строго регламентированные времена выведения двигателя на промежуточную и главную ступени тяги. В результате разброс времени запуска и выхода на режим всех двигателей в составе ДУ ступени ракеты не превышает 0.05 с. Регулирование осуществляется при помощи регулятора тяги 17 и регулятора соотношения компонентов 19. Выключение двигателя производится путем прекращения подачи горючего в газогенератор при закрытии клапана 18, с последующей продувкой ТНА и рубашки камеры сгорания.

2.2 Особенности численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД НК-33



1-огневая часть камеры сгорания ; 2-предфорсуночная полость ; 3- среднее днище ; 4-огневое днище;
5- двухкомпонентные струйно-центробежные форсунки;
6 -выравнивающая решетка

Рисунок 2.2 – Форсуночная головка ЖРД НК-33

Особенности численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД НК-33 обусловлены ее конструкцией и являются характерными для современных ЖРД с

использованием генераторного газа.

Форсуночная головка камеры сгорания ЖРД НК-33 показана на рисунке 2.2. Поверхность переднего (огневого) днища гладкая, без антипульсационных перегородок. Задача обеспечения устойчивости рабочего процесса в камере сгорания решается организацией выноса колебательной энергии из объема камеры сгорания через удлиненные газовые форсунки, выступающие над средним днищем и образующие эффективный акустический поглотитель. Такое решение позволяет осуществлять надежное акустическое демпфирование высокочастотных колебаний в огневой части камеры сгорания при простом ее конструктивном

исполнении, без нарушения оптимального расположения форсунок, при сохранении надежного охлаждения.

Форсуночная головка ЖРД НК-33 содержит 127 штук основных форсунок и 57 штук пристеночных форсунок.

Конструкции основных и пристеночных форсунок в основном идентичны и отличаются, главным

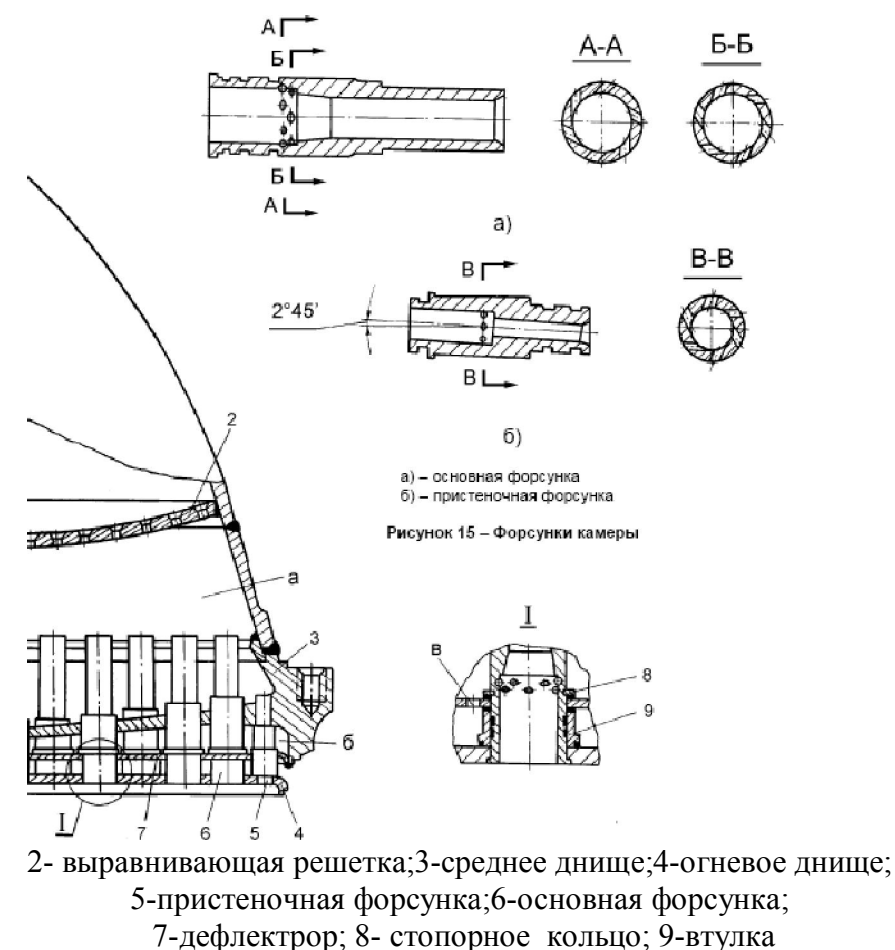


Рисунок 2.3 – Фрагмент форсуночной головки ЖРД НК-33 с видами основной и пристеночной форсунок

образом, диаметром внутренних каналов таким образом, что расходы компонентов топлива через пристеночную форсунку примерно в четыре раза меньше, чем через основную (см. рисунок 2.3). Форсунки двухкомпонентные с

внутренним смешением. Форсунка окислителя струйная и представляет собой цилиндрический канал определенного профиля, через который подается генераторный газ с большим коэффициентом избытка окислителя. Форсунка горючего центробежная.

Распыление закрученного потока горючего (керосина) осевым потоком генераторного газа и их смешение начинается внутри осевого канала струйной форсунки окислителя и продолжается за пределами форсунки в области смесеобразования форсуночной головки. В области смесеобразования форсуночной головки ЖРД НК-33 происходят процессы испарения капель керосина в среде генераторного газа и диффузия компонентов топлива в газовой фазе. При этом существенную роль, с одной стороны, играют процессы взаимодействия между собой потоков компонентов, вытекающих из разных форсунок, а с другой стороны – взаимосвязь процессов в области смесеобразования с процессами в области горения за счет конвективного и радиационного теплообмена. Для пристеночных форсунок к этому добавляется еще взаимодействие пристенка с продуктами смесеобразования в ядре с одной стороны, и со стенкой камеры сгорания – с другой. При этом для ЖРД существенной является связь процессов формирования поля скоростей в камере сгорания с течением продуктов сгорания в сверхзвуковом сопле, поскольку располагаемый перепад давлений по длине камеры существенно превышает критический. В целом из вышеизложенного следует вывод, что основная особенность численного моделирования потоков компонентов в форсуночной головке ЖРД связана с сопряженным характером гидродинамических, газодинамических, химических и теплообменных процессов как друг с другом, так и между камерой сгорания и соплом.

Такой сопряженный характер процессов смесеобразования в форсуночной головке ЖРД обусловил проведение численного моделирования этих процессов в виде совокупности изложенных ниже взаимосвязанных между собой этапов.

2.3 Основные этапы численного моделирования потоков компонентов топлива в форсуночной головке камеры ЖРД

Содержание первого этапа составляет численное моделирование потоков компонентов топлива в пневмофорсунке, схема которой представлена на рисунке 2.4. Цель этого этапа – освоить численное моделирование основных физических процессов смесеобразования – распыливание, испарение капель и диффузию при истечении компонентов топлива в затопленное пространство.

На втором этапе проводится численное моделирование процесса течения генераторного газа в камере сгорания модельного ЖРД. Модельный ЖРД представляет собой камеру, поле течения в камере сгорания которой идентично с полем течения в камере сгорания ЖРД НК-33, а форсуночная головка представляет собой пневматическую форсунку с осевым коаксиальным каналом подачи генераторного газа в осевой форсунке и центробежной коаксиальной форсункой горючего. Расходы через эту форсунку, скорости движения и начальная температура компонентов идентичны двухкомпонентной форсунке штатного ЖРД НК-33. Таким образом, на втором этапе фактически создается численная модель внешней среды, характерная для потоков компонентов топлива форсуночной головки камеры сгорания ЖРД. Исходные данные, необходимые для расчетного определения этих параметров модельной форсунки, приведены в приложении А.

Ниже приведены результаты расчетного определения основных параметров двухкомпонентной форсунки модельного ЖРД, в камере сгорания которого проводилось численное моделирование процесса течения генераторного газа.

Параметры для форсунки окислителя

внутренний диаметр форсунки окислителя - 16 мм

внешний диаметр двухкомпонентной форсунки – 24 мм

давление на входе в сопло – 15 МПа

секундный расход генераторного газа через форсунку – 2.62 кг/с

температура генераторного газа – 570 К

осевая скорость на выходе из форсунки окислителя – 220 м/с

отношение радиуса камеры сгорания к радиусу минимального сечения – 1.53 (это отношение определяет скорость в камере сгорания и аналогично отношению r_r / r_* для камеры штатного ЖРД НК-33)

Параметры для форсунки горючего (керосина)

внутренний диаметр кольцевого сечения форсунки горючего – 17.5 мм

внешний диаметр кольцевого сечения форсунки горючего – 20.5 мм

секундный расход керосина через кольцевое сечение форсунки – 1 кг/ с

температура керосина , подаваемого в форсунку- 400 К

плотность керосина – 830 кг/м³

осевая скорость керосина на выходе из форсунки- 13.5 м/с

диаметр капель – 20 микрон [5]

Результаты первого и второго этапов используются на третьем этапе, цель которого состоит в численном моделировании процесса испарения капель керосина в среде генераторного газа для модельного ЖРД, поле течения в камере сгорания которого идентично полю течения в камере сгорания штатного ЖРД НК-33.

Результаты численного моделирования на каждом из трех этапов описываются соответственно в главах 3, 4 и 5 данного учебного пособия

3 Численное моделирование в Ansys Fluent потоков компонентов топлива в пневмофорсунке

3.1 Постановка задачи

На первом этапе рассмотрим задачу о численном моделировании в Ansys Fluent потоков компонентов топлива в пневматической форсунке. Схема такой форсунки представлена на рисунке 3.1[8].

В форсунке данного типа дополнительная подача газа по оси форсунки используется для интенсификации процесса распада пленки жидкости.

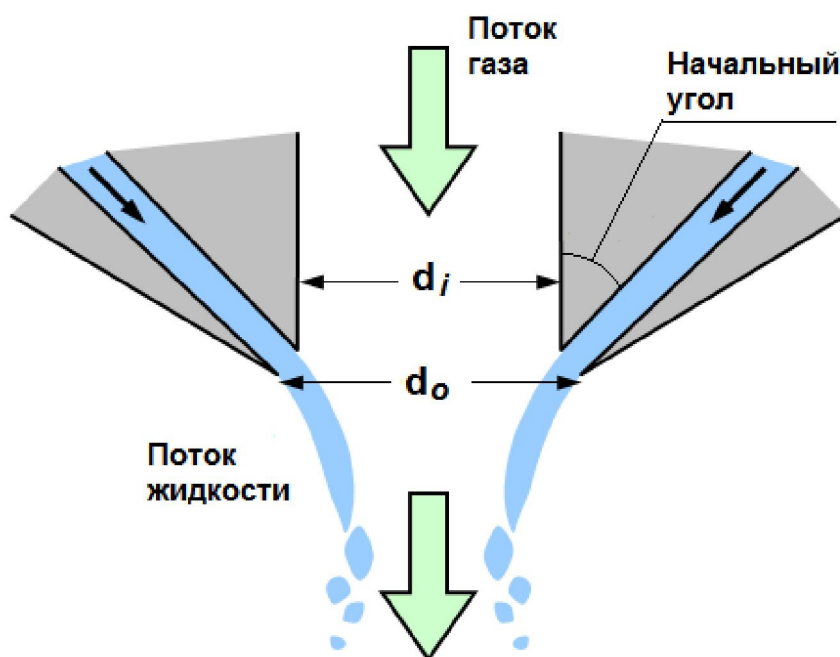


Рисунок 3.1 – Схема процессов смесеобразования в пневматической форсунке

В результате получаются более мелкие капли, чем на выходе из нагнетательной вихревой форсунки. Как и в случае нагнетательной вихревой форсунки, детали механизма образования капель на сегодняшний день окончательно не ясны, но, тем не менее,

можно предположить, что подача воздуха ускоряет развитие неустойчивости свободной пленки жидкости. Кроме того, поток воздуха способствует дисперсии капель, предотвращая их столкновения и слияние.

В ANSYS Fluent модель пневматической форсунки является, таким образом, разновидностью модели нагнетательной вихревой форсунки. Основное различие между ними заключается в том, что толщина пленки t для пневматической форсунки не вычисляется, а задается как параметр форсунки. Как и для нагнетательной вихревой форсунки, еще одним параметром является

максимальная относительная скорость пленки. Так толщина пленки жидкости в пневматических форсунках, как правило, достаточно велика, то предполагается, что распад пленки происходит за счет роста коротких волн. Соответственно, диаметр лигамента считается пропорциональным длине волны, рост которой провоцирует распад пленки.

Угол θ соответствует начальному углу на рисунке 3.1 . Для случая впрыска по направлению к оси (как на рисунке 3.1), значения этого угла отрицательные, для случая впрыска по направлению от оси – значения угла положительные.

Вместо одного выходного диаметра d для пневматической форсунки указываются два значения диаметра внутренний d_i и внешний d_o – см. схему на рисунке 3.1 .

Следует отметить, что данная модель форсунки не учитывает влияние осевого подвода газа на течение сплошной среды в окрестности форсунки. Для его учета необходимо непосредственно задать входное граничное условие для сплошной среды, указав для него скорость или расход газа. Эти вопросы являются

предметом рассмотрения второго этапа моделирования.

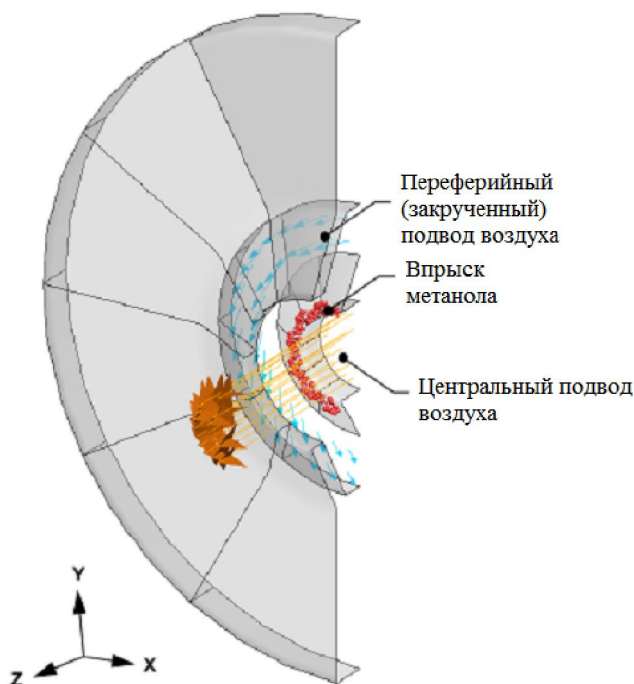


Рисунок 3.2- Постановка задачи моделирования пневматической форсунки

Более конкретная постановка задачи численного моделирования потоков компонентов топлива в пневматической форсунке показана на рисунке 3.2 [9]. В этой постановке воздух подается через два сопла – осевое и кольцевое. Через кольцевое сопло подается и охлажденный до -10°C метанол. Так как геометрия и граничные условия

осесимметричные, то для простоты будет рассматриваться не полная форсунка, а

сектор в 30° . рамках данного примера не будет рассматриваться построение расчетной сетки. Вместо этого воспользуемся уже готовой сеткой из прилагающегося файла *sector.msh*. Прочитаем сетку с помощью команд главного меню:

File -> Read -> Mesh...

Общий вид сетки показан на рисунке 3.3. Т.к. сетка построена для сектора, на боковых поверхностях будут использоваться специальные граничные

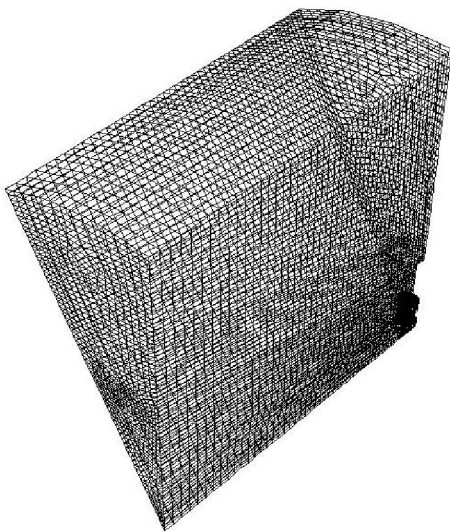


Рисунок 3.3 - Общий вид расчетной сетки

условия циклической симметрии (Rotational Periodic в терминологии, используемой в ANSYS Fluent). Fluent сам распознает типы граничных условий с соответствии с названиями областей, поэтому боковым поверхностям (областям *periodic-a* и *periodic-b*) будет автоматически присвоен тип **periodic**. Однако

необходимо явно указать, что используется именно циклическая симметрия. Для этого на панели **Boundary conditions** нужно выбрать в списке область **periodic-a** и в окне ее свойств, вызываемом по кнопке **Edit**, указать опцию **Rotational** (см. рисунок 3.4). То же самое затем проделать с областью **periodic-b**.

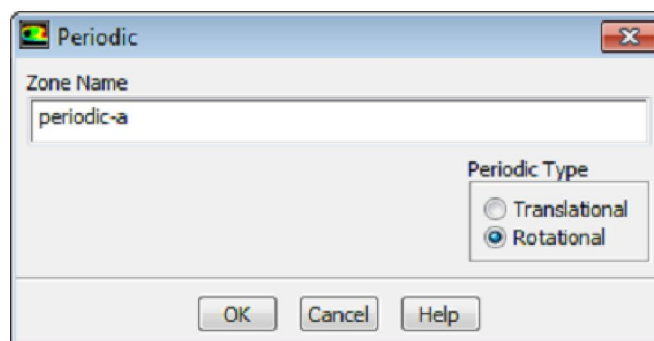


Рисунок 3.4 - Задание условий циклической симметрии

3.2 Порядок подключения используемых физических моделей

На панели **Models** нужно подключить дополнительные физические модели:

 **Models** →  **Energy** → **Edit...**

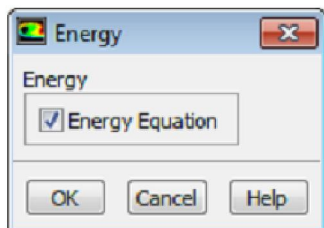


Рисунок 3.5 - Подключение уравнения энергии

1. Уравнение энергии (т.к. течение не изотермическое), см. рисунок 3. 5.
2. Модель турбулентности (т.к. числа Рейнольдса в данном случае достаточно велики). Для простоты будет использоваться модель Realizable k-ε, см. рисунок 3.6 .

 **Models** →  **Viscous** → **Edit...**

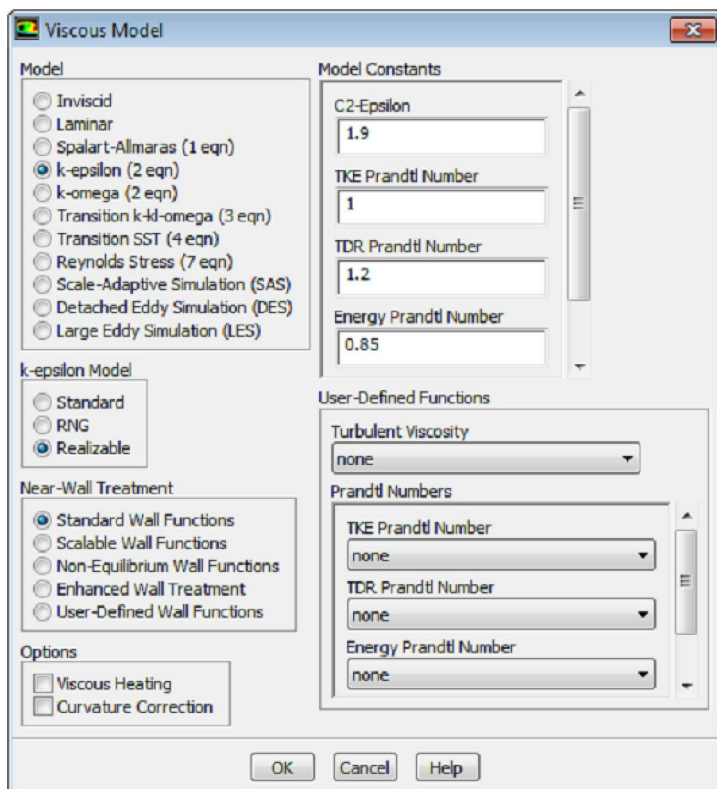


Рисунок 3.6 - Подключение модели турбулентности

3. Модель многокомпонентной среды (т.к. вследствие испарения капель метанола сплошная фаза в данной задаче будет представлять собой смесь воздуха и паров метанола), см. рисунок 3.7. При подключении модели

многокомпонентной среды можно сразу выбрать одну из predetermined смесей из списка **Mixture Material**. Смесь воздуха и паров метанола есть в этом списке под именем **metil-alcohol-air**. После выбора смеси из списка будет показано окно с сообщением о том, что обновился список доступных веществ (см. рисунок 8). В нем нужно просто нажать кнопку ОК для закрытия.

 Models →  Species → Edit...

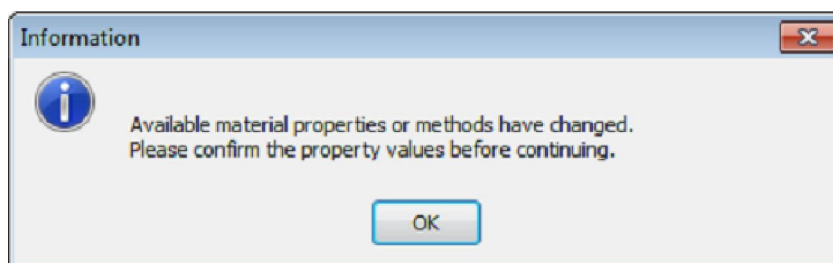


Рисунок 3.8- Сообщение об изменении списка доступных веществ

На панели **Materials** можно просмотреть список доступных веществ (см.

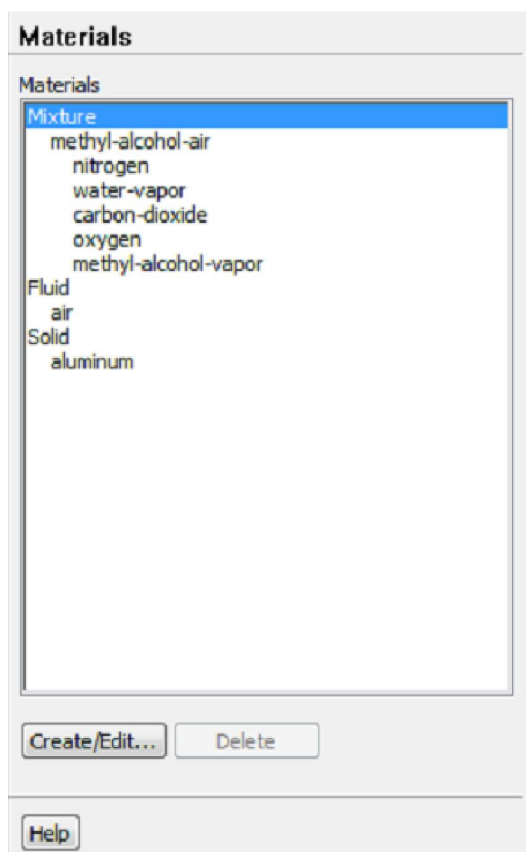


Рисунок 3. 9- Панель доступных веществ

рисунок 3. 9). Как видно из рисунка, в разделе Mixture присутствует выбранная нами смесь **metil-alcohol-air**, состоящая из пяти компонентов: азота (**nitrogen**), водяных паров (**water-varour**), углекислого газа (**carbon-dioxide**), кислорода (**oxygen**) и паров метанола (**metil-alcohol-varour**). Мы будем рассматривать задачу в упрощенной постановке, и нам будет достаточно смеси из трех компонентов: азота и кислорода, и паров метанола. Для редактирования состава смеси нужно выбрать в списке пункт **Mixture** и нажать кнопку **Create/Edit...** В окне свойств смеси (см. рисунок 3.10) надо нажать кнопку **Edit...** в

строке Mixture Species (компоненты смеси). Откроется новое окно (см. рисунок 3.11) со списками компонентов смеси – текущих выбранных (Selected Species) справа и доступных (Available Materials) слева. В правом списке нужно выбрать **co2** и нажать кнопку **Remove** для удаления углекислого газа. Аналогичным образом нужно удалить водяной пар, **h2o**.

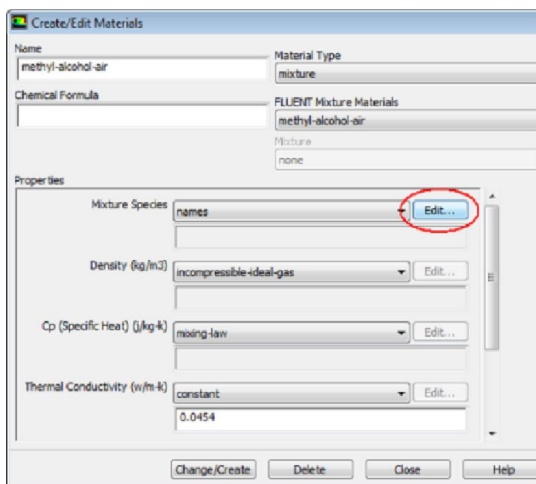


Рисунок 3. 10- Окно свойств смеси

Обратите внимание, что порядок компонентов в списке имеет значение! Для определения локальных концентраций компонентов необходимо решать дифференциальные уравнения конвективно-диффузионного переноса. Однако, поскольку из закона сохранения массы сумма концентраций всех компонентов всегда равна 1, для смеси из N компонентов достаточно решать

только N-1 дифференциальное уравнение – концентрацию одного компонента можно найти из условия равенства 1 суммы концентраций. Такой компонент

называют

«лимитирующим».

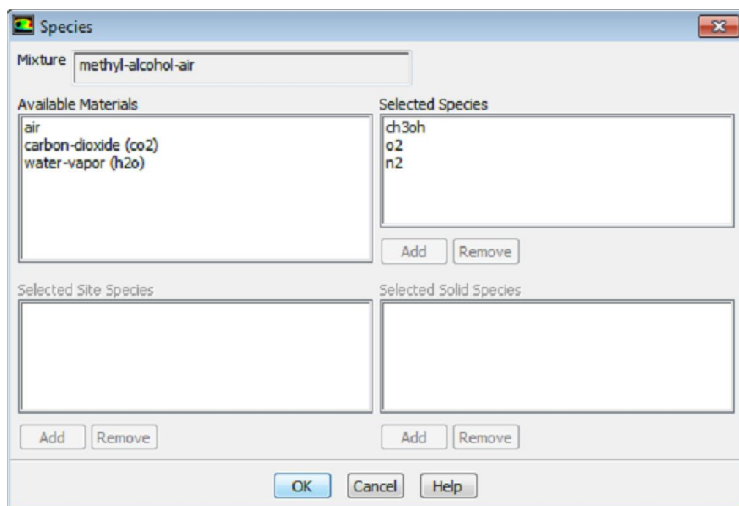


Рисунок 3. 11- Окно компонентов смеси

Для уменьшения относительной ошибки определения концентрации в

качестве

лимитирующего

целесообразно

выбирать компонент с

наибольшим содержанием. В данном случае это азот. В ANSYS Fluent лимитирующим считается компонент, стоящий на последнем месте в списке

компонентов смеси. Именно поэтому азот (n_2) стоит в списке компонентов последним.

3.3 Порядок задания граничных условий

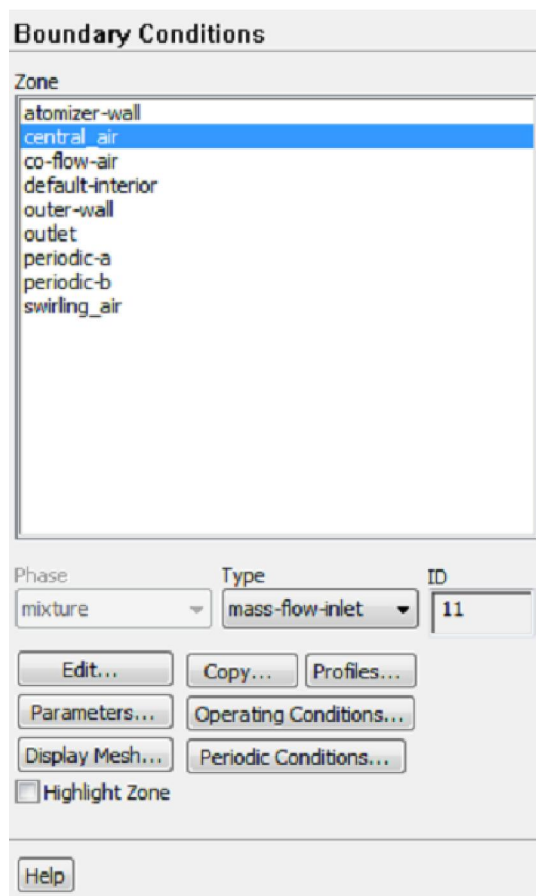


Рисунок 3.12. Панель граничных условий

На панели **Boundary Conditions** (см. рисунок 3.12) необходимо задать граничные условия. Область `central_air` соответствует осевому соплу форсунки. Для него будет задан массовый расход воздуха, поэтому тип граничного условия здесь `mass-flow-inlet`. Выберем в списке **central-air** и нажмем на кнопку **Edit...**

Откроется окно граничных условий (см. рисунок 3.13).

Boundary Conditions → central_air → Edit...

В окне граничных условий задаем

- в поле **Mass Flow Rate (kg/s)** (массовый расход): **9.167e-5** (это 1/12 расхода через центральное сопло

форсунки, т.к. мы моделируем сектор в 30°);

- в поле **X-Component of Flow Direction: 0**;

- в поле **Z-Component of Flow Direction: 1** (модель построена таким образом, что оси форсунки соответствует ось Z глобальной системы координат);

- в разделе **Turbulence** поменяем способ задания начальных параметров турбулентности (**Specification Method**) на **Intensity and Hydraulic Diameter** (интенсивность и гидравлический диаметр, гидравлический диаметр будет использован для вычисления масштаба турбулентности);

- в поле **Turbulent Intensity (%)**: **10** (соответствует умеренной турбулентности, характерной для развитого течения в круглой трубе);

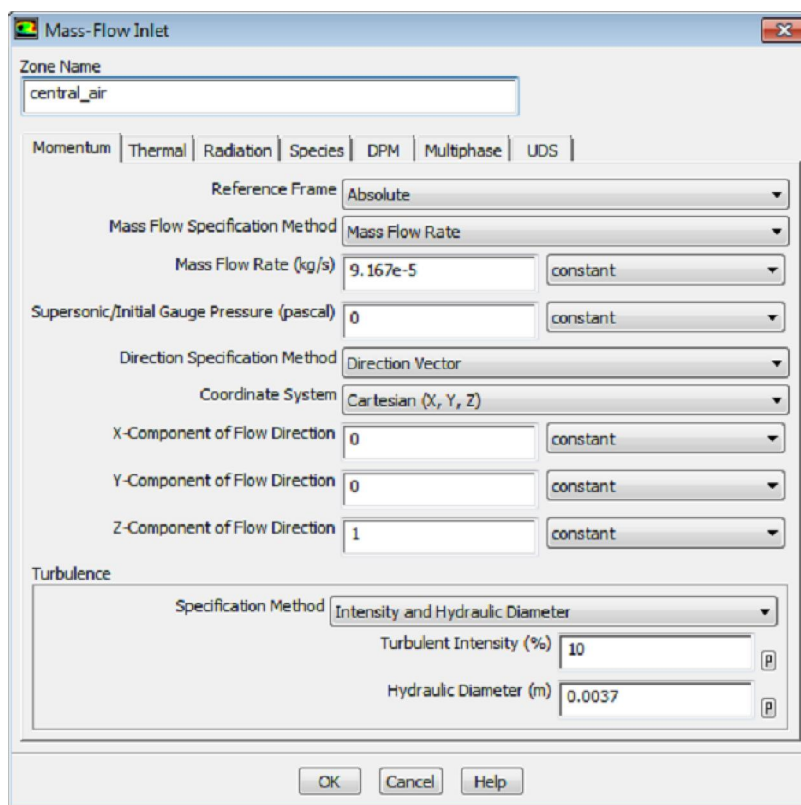


Рисунок 3.13 - Окно граничных условий для осевого сопла (область central air)

Boundary Conditions → co-flow-air → Edit...

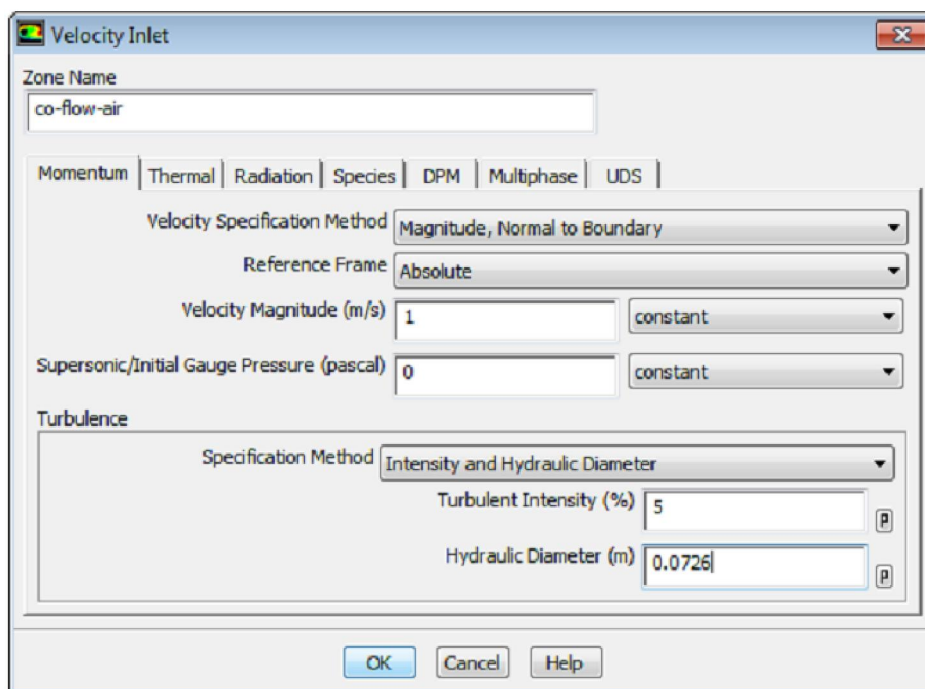


Рисунок 3.14. Окно граничных условий для внешнего Потокa (область co-flow-air)

- в поле **Hydraulic Diameter (m): 0.0037** (это диаметр осевого сопла);
- на вкладке **Termal** в поле **Total Temperature (k): 293**;
- на вкладке **Species** в поле **o2: 0.23** (концентрацию паров метанола в поле **ch3oh** оставляем равной 0, т.к. пары метанола на входе отсутствуют, они появляются только в следствие испарения капель).

Затем зададим граничные условия для внешнего потока воздуха вокруг форсунки (область co-flow-air), см. рисунок 3.14. Для этой области будет задаваться скорость потока воздуха, поэтому тип граничных условий здесь velocity-inlet.

В окне

граничных условий задаем

- в поле **Velocity Magnitude (m/s)** (величина скорости): 1;
- в разделе **Turbulence** поменяем способ задания начальных параметров турбулентности (**Specification Method**) на **Intensity and Hydraulic Diameter** (интенсивность и гидравлический диаметр, гидравлический диаметр будет использован для вычисления масштаба турбулентности);
- в поле **Turbulent Intensity (%)**: 5 (соответствует малой турбулентности);
- в поле **Hydraulic Diameter (m)**: 0.0726 (это гидравлический диаметр кольцевой области на входе в цилиндр, содержащий форсунку);
- на вкладке **Thermal** в поле **Total Temperature (k)**: 293;
- на вкладке **Species** в поле **o2**: 0.23.

Затем зададим граничные условия на выходе из расчетной области (область **outlet**), см. рисунок 3.15. Для этой области будет задаваться давление на выходе, поэтому тип граничных условий здесь **pressure-outlet**.

 **Boundary Conditions** →  **outlet** → **Edit...**

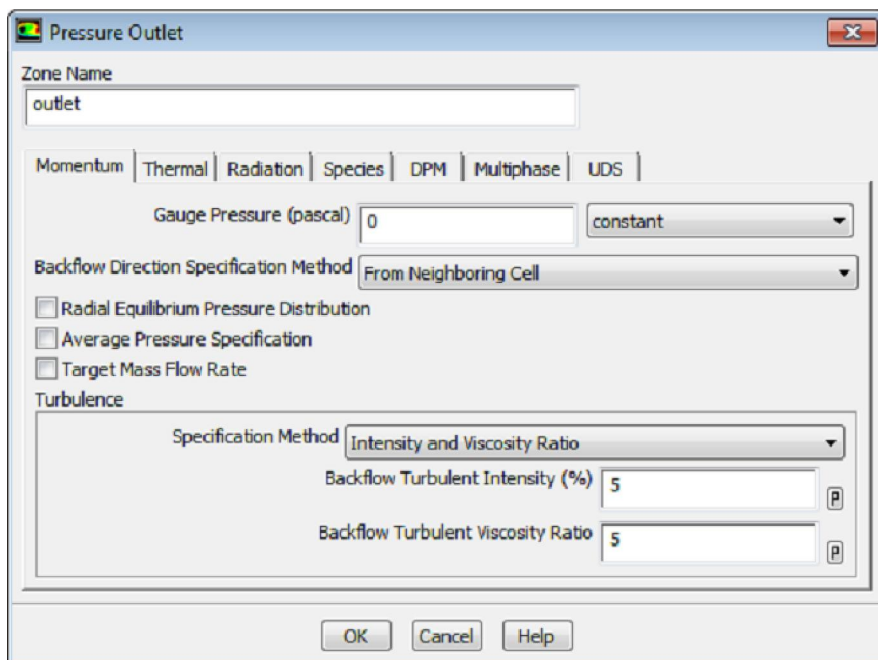


Рисунок 3.15- Окно граничных условий для выходной границы (область **outlet**)

В окне граничных условий задаем :

- поменяем способ определения направления течения при возникновении обратных токов (**Backflow Direction Specification Method**) на **From Neighboring Cell** (по соседним ячейкам);

Внимание : все дальнейшие

параметры на выходной границе (параметры турбулентности, температура,

концентрации компонентов) будут использовать только при возникновении обратных токов.



- в разделе Turbulence в поле **Backflow Turbulence Viscosity Ratio: 5** (в данном случае задаются параметры, соответствующие малой турбулентности);

- на вкладке **Thermal** в поле **Backflow Total Temperature (k): 293**;

- на вкладке **Species** в поле **o2: 0.23**.

Затем зададим граничные условия для кольцевого сопла (область `swirling_air`), см. рисунок 3.16. Для этой области будет задаваться скорость потока воздуха, поэтому тип граничных условий здесь `velocity-inlet`.

Направление потока воздуха здесь будет в дальнейшем определять направление впрыска капель, т.к. при задании условий впрыска мы укажем только относительную скорость капель.

 **Boundary Conditions** →  `swirling_air` → **Edit...**

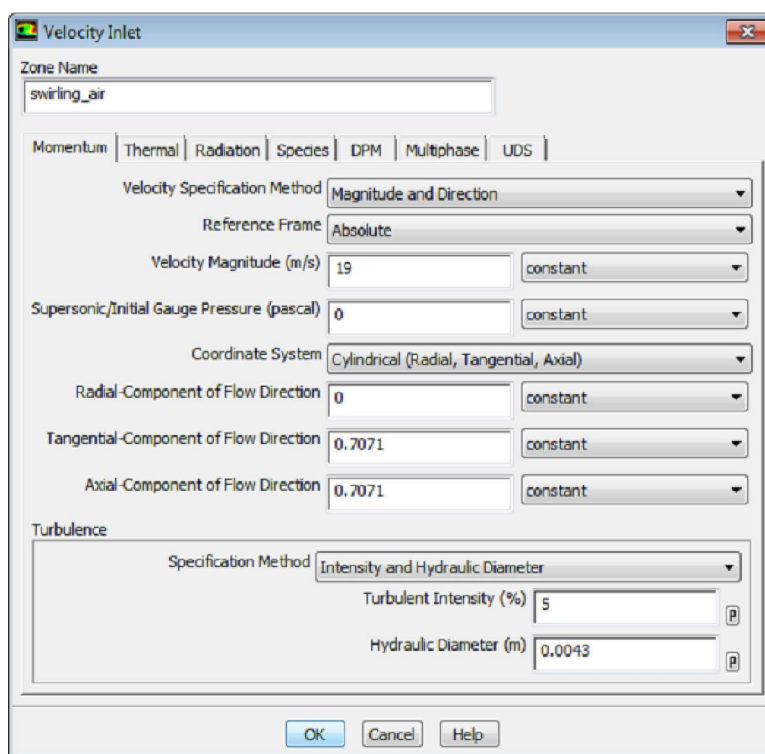


Рисунок 3.16- Окно граничных условий для кольцевого сопла (область `swirling_air`)

В окне граничных условий задаем

- поменяем способ задания скорости (**Velocity Specification Method**) на **Magnitude and Direction** (величина и направление).
- в поле **Velocity Magnitude (m/s)** (величина скорости): 19;
- поменяем систему координат (**Coordinate System**) на **Cylindrical**

(Radial, Tangential, Axial) (т.к. через кольцевое сопло подается закрученный поток, то его скорость удобнее задавать в цилиндрической системе координат);

- в поле **Radial-Component of Flow Direction: 0**;

- в поле **Tangential-Component of Flow Direction: 0.7071**;

- в поле **Axial-Component of Flow Direction: 0.7071** (указываемые компоненты не обязательно должны быть компонентами единичного вектора, Fluent сам осуществляет нормировку; в данном случае 0,7071 – это $\cos 45^\circ$ и $\sin 45^\circ$);

- в разделе **Turbulence** поменяем способ задания начальных параметров турбулентности (**Specification Method**) на **Intensity and Hydraulic Diameter** (интенсивность и гидравлический диаметр, гидравлический диаметр будет использован для вычисления масштаба турбулентности);

- в поле **Turbulent Intensity (%)**: **5** (соответствует малой турбулентности);

- в поле **Hydraulic Diameter (m)**: **0.0043** (это гидравлический диаметр кольцевого сопла);

- на вкладке **Thermal** в поле **Total Temperature (k)**: **293**;

- на вкладке **Species** в поле **o2**: **0.23**.

Boundary Conditions → outer-wall → Edit...

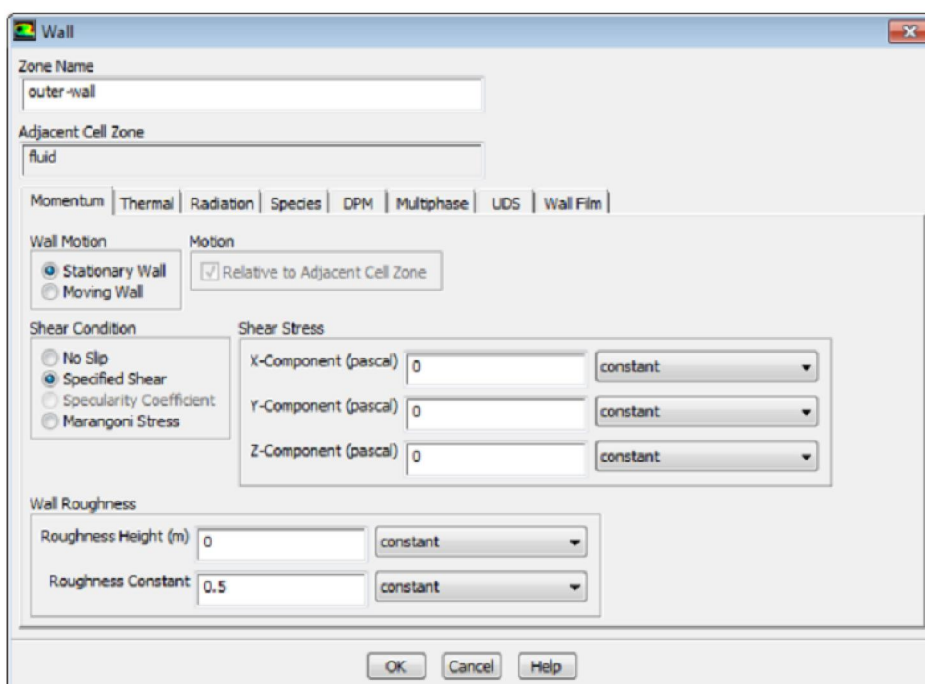


Рисунок 3.17 Окно граничных условий для внешней стенки (область outer-wall)

В заключение зададим граничные условия на внешней поверхности расчетной области (область outer-wall), см. рисунок 3.17. Это стенка, поэтому тип граничных условий здесь wall.

Так как нас не интересует влияние пограничного слоя на этой стенке на течение в расчетной области, то вместо обычного для стенок условия прилипания мы зададим условие непротекания. Для этого в разделе **Shear Condition** выберем опцию **Specified Shear**. По умолчанию компоненты вектора напряжений на стенке будут равны нулю, это и соответствует нужным нам условиям.

3.4 Формирование процесса численного решения течения газовой фазы без капель

На первом этапе мы получим решение для течения газа (воздуха) без капель. Это рекомендуемая практика в такого рода задачах – сначала получить сошедшее решение для течения газа, и лишь только после этого перейти к моделированию двухфазного течения с впрыском капель.

На панели **Solution Methods** выберем сопряженный (**Coupled**) метод в разделе **Pressure-Velocity Coupling** (см. рисунок 3. 18). При использовании

сопряженного метода уравнения для скоростей и давления решаются совместно, одной матрицей. Это позволяет получить сошедшее решение за меньшее число итераций. Течение газа в данной задаче стационарное, но для получения решения мы будем решать нестационарную задачу на установление, с автоматическим или ручным заданием шага по времени. Для этого на той же панели **Solution Methods** надо включить опцию **Pseudo Transient** (псевдо нестационарное решение).

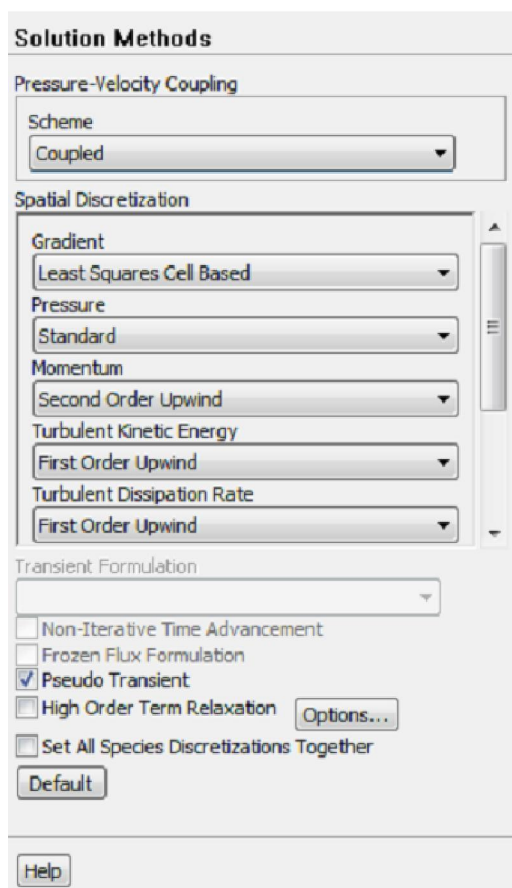


Рисунок 3.18 Панель настроек решателя **Solution Methods**

Для запуска процесса решение необходимо начальное поле параметров течения. Оно задается на панели **Solution Initialization** (см. рисунок. 3.19). Оставим выбранную по умолчанию опцию **Hybrid Initialization** и нажмем кнопку **Initialize**. Fluent построит начальное поле скоростей, давлений и температур газа, опираясь на граничные значения и решение задачи о потенциальном течении. На этом этапе рекомендуется сохранить файл постановки задачи (cas-файл) перед запуском расчета:

File -> Write -> Case...

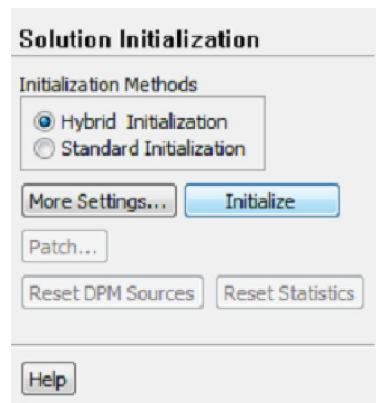


Рисунок 3.19. Панель инициализации (построения начального поля параметров течения)

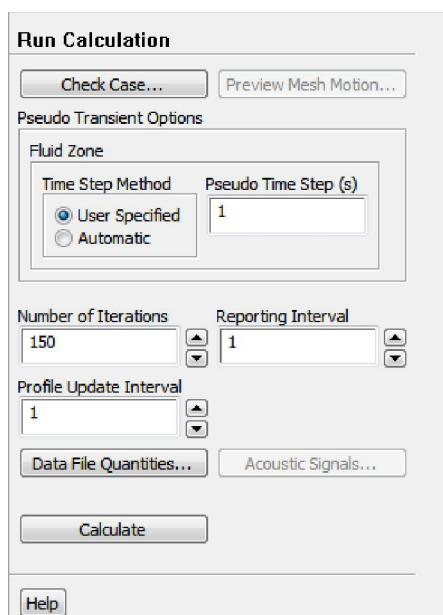


Рисунок 3.20. Панель запуска решения

рисунок 3.21).

На панели **Run Calculation** (см. рисунок 3. 20) мы зададим значение шага по вседо-времени и число шагов (итераций). Для задания шага по псевдо-времени (**Time Step Method**) выберем опцию **User Specified** (задаваемый пользователем) и укажем в поле **Pseudo Time Step (s)**: 1. В поле **Number of Iterations** укажем 150. Для запуска решения надо нажать кнопку **Calculate**. В ходе решения в графическом окне будут отображаться графики невязок (см.

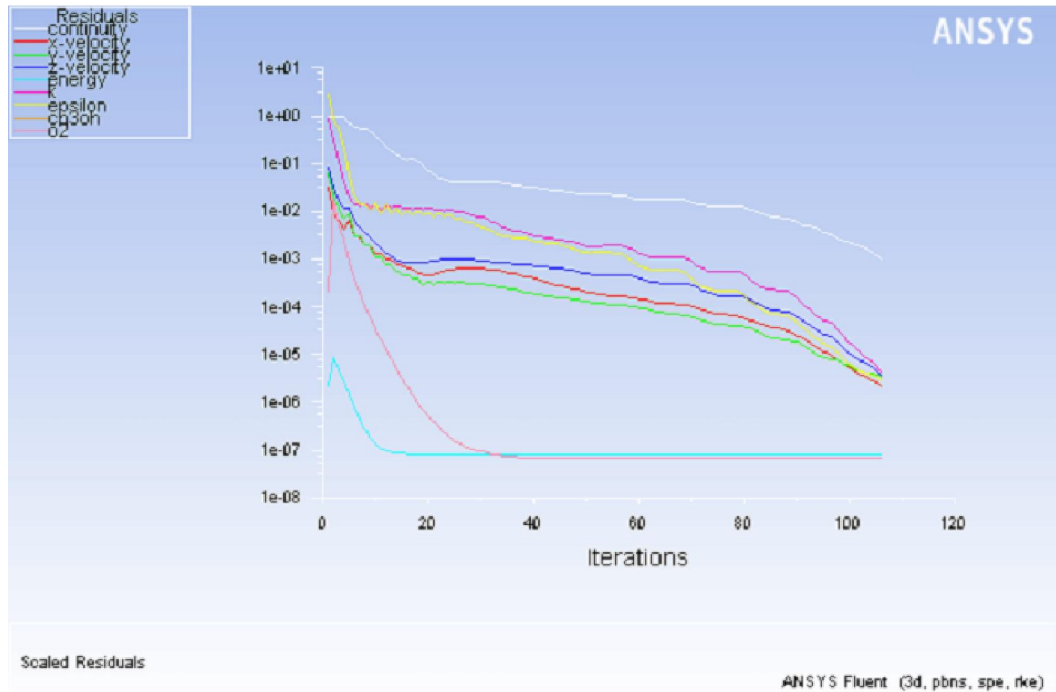


Рисунок 3.21. Графики невязок, отображаемые в ходе решения

Сошедшееся решение будет достигнуто примерно за 100 шагов по псевдо-времени. Перед переходом ко второму этапу рекомендуется сохранить файл постановки задачи и файл результатов:

File -> Write -> Case&Data...

При этом Fluent попросит подтвердить перезапись файл постановки задачи (т.к. мы уже сохраняли его перед началом расчета).

Перед решением задачи о двухфазном течении с каплями полезно проанализировать полученную картинку течения газа, чтобы убедиться в адекватности полученных результатов. Для этого построим поле скорости в продольном сечении расчетной области и линии тока газа.

Для построения поля скорости создадим плоскость сечения:

Surface -> Iso-Surface...

В окне построения изоповерхностей (см. рисунок 3.22) в разделе **Surface of Constant** выберем группу переменных **Mesh...** (сетка), а в ней переменную **Angular Coordinate** (угловая координата). В поле **Iso-Values (deg)** зададим значение: **15**. В поле **New Surface Name** можно задать свое имя изоповерхности

вместо имени по умолчанию. Заменяем имя на более понятное **angle=15** и завершим создание изоповерхности нажатием на кнопку **Create**.

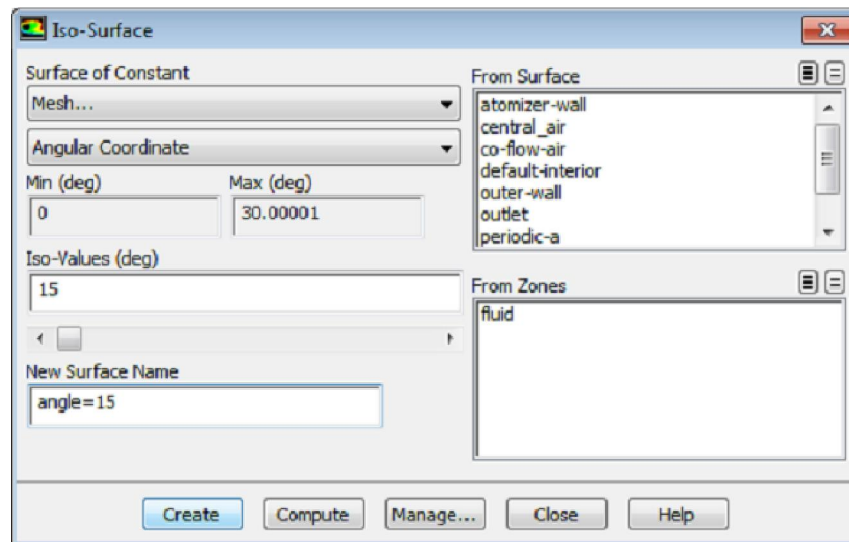


Рисунок 3. 22 - Окно создания изоповерхностей

Теперь на созданной плоскости сечения отобразим поле скорости в контурном виде. За визуализацию результатов отвечает панель **Graphics and Animations** (см. рисунок 3. 23).

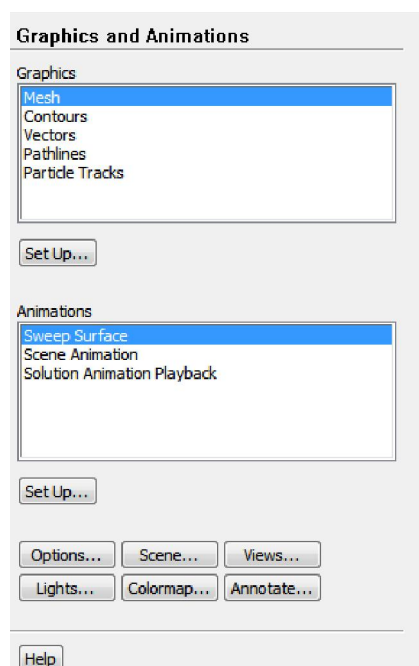


Рисунок 3. 23. Панель визуализации
Graphics and Animations

Настроим параметры контурного отображения (см. рисунок 3. 24).

Graphics and Animations → Contours → Set Up...

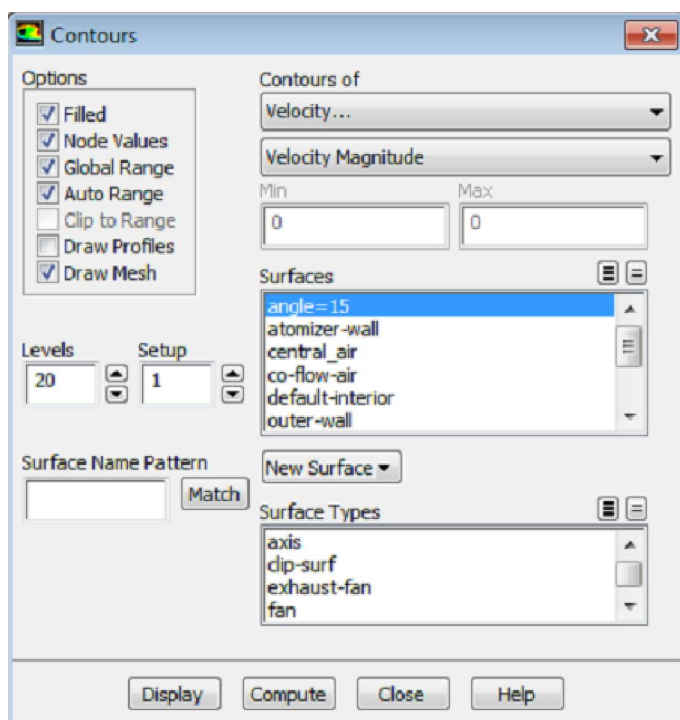


Рисунок 3.24. Окно параметров контурного отображения **Contours**

В разделе **Contours of** выберем группу переменных **Velocity...**, а в ней переменную **Velocity Magnitude** (величина скорости). В разделе **Options** включим опции **Filled** (заливка между линиями контуров) и **Draw Mesh** (отображение вместе с контурным представлением выбранной переменной дополнительных поверхностей). При выборе опции **Draw Mesh** откроется окно **Mesh Display** (см. рис. 23), где в списке

Surfaces можно выбрать поверхности для совместного отображения с полем скорости в сечении. Выберем поверхности **atomizer-wall** (поверхность форсунки), **central_air** (центральное сопло) и **swirling_air** (кольцевое сопло) и закроем окно **Mesh Display**. Вернувшись к окну **Contours** выберем в списке **Surfaces** нашу плоскость сечения **angle=15** и нажмем кнопку **Display** для построения отображения. В результате в графическом окне получим картинку, аналогичную показанной на рис. 24. На рисунке хорошо виден слой смешения, развивающийся на границе струи.

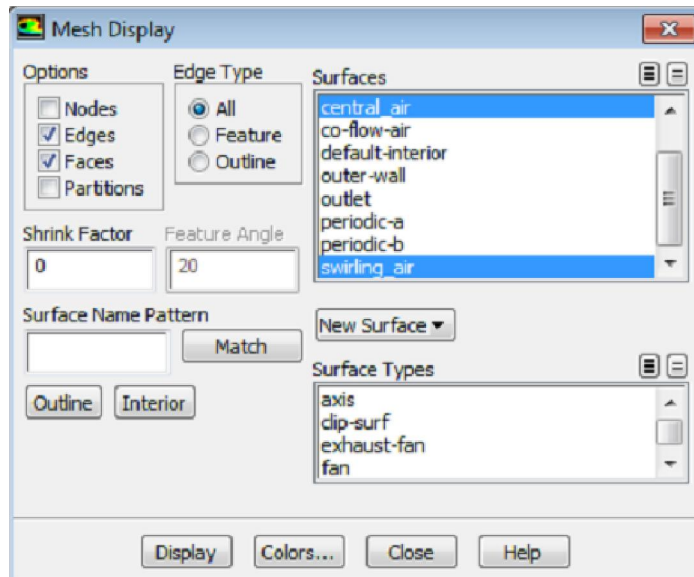


Рисунок 3.25 - Окно дополнительного отображения поверхностей **Mesh Display**

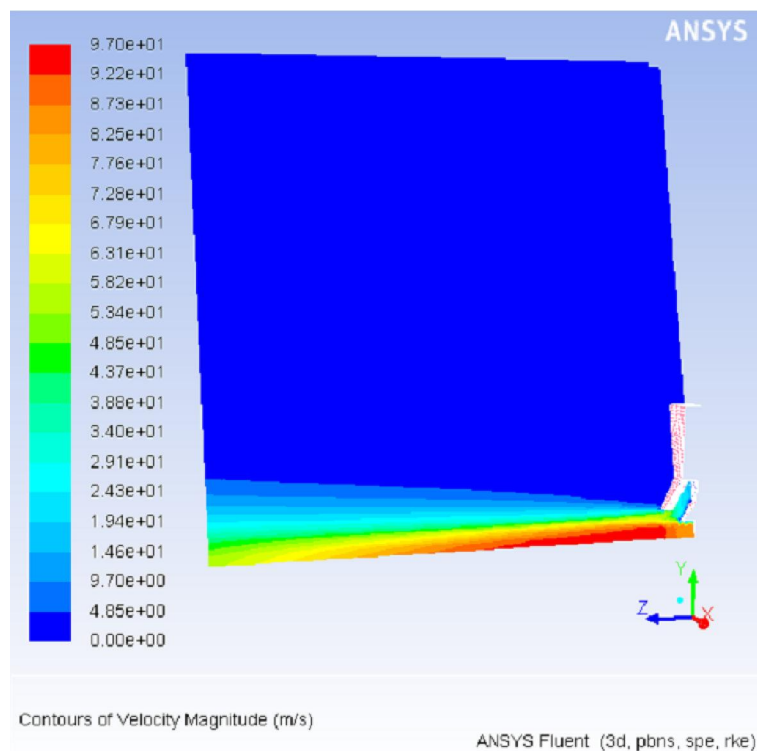


Рисунок 3.26- Поле скорости в продольном сечении расчетной области

Так как через кольцевое сопло подается закрученный поток, одной только картины величины скорости в продольном сечении недостаточно для полного представления о характере течения. Построим также линии тока газа, выходящего из форсунки. Для удобства их анализа сначала «размножим» наши результаты с 30-градусного сектора на полную окружность:

Display -> Views...

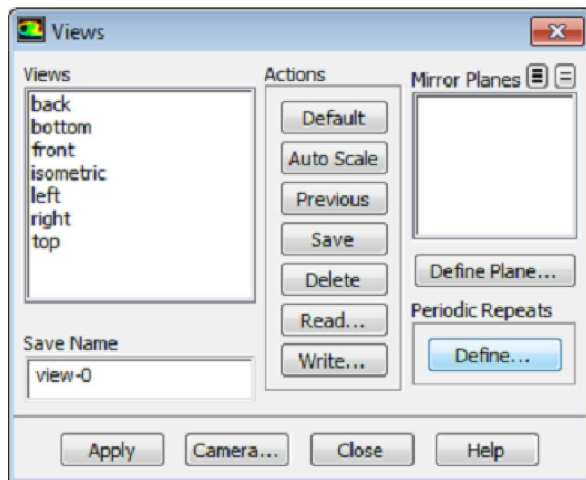


Рис. 3.27- Окно настройки видов

В окне настройки видов (см. рисунок 3.27) нажмем кнопку **Define...** в разделе **Periodic Repeats**. Откроется дополнительное окно настроек (см. рисунок 3. 28). В нем выберем зону **fluid** в списке **Cell Zones** (при этом в списке **Associated Surfaces** будут автоматически выбраны все относящиеся к ней поверхности).

Настройки

периодичности Fluent выберет сам, исходя из имеющихся граничных условий

циклической симметрии

(тип периодичности

(periodic type):

вращательная (rotational),

размер сектора (angle): 30°,

число копий (number of

repeats): 12). Нажмем

кнопку **Set** и закроем окно

настроек. Затем нажмем

кнопку **Apply** и закроем окно

настройки видов.

Для построения линий тока

вернемся к панели **Graphics and Animations**.

 **Graphics and Animations** →  **Pathlines** → **Set Up...**

В окне построения линий тока (рисунок 3. 29) в списке **Release from Surfaces**

выберем поверхность **swirling_air**.

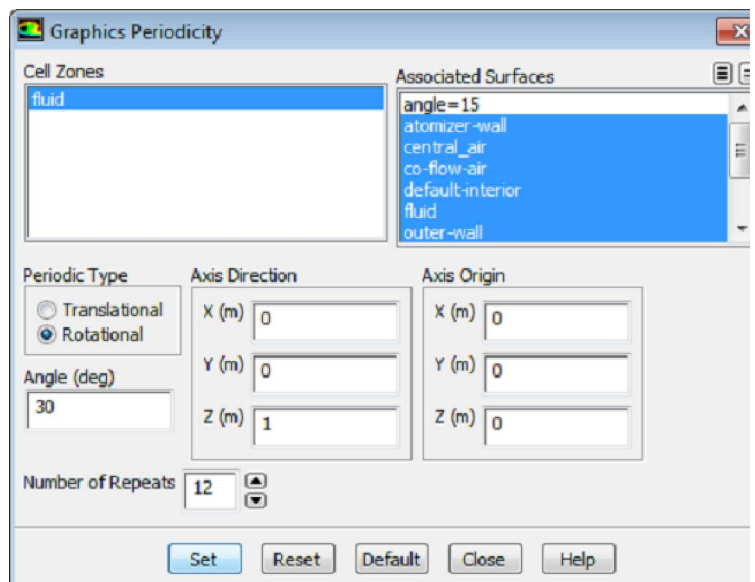


Рис. 328- Окно «размножения» результатов, полученных с периодическими граничными условиями

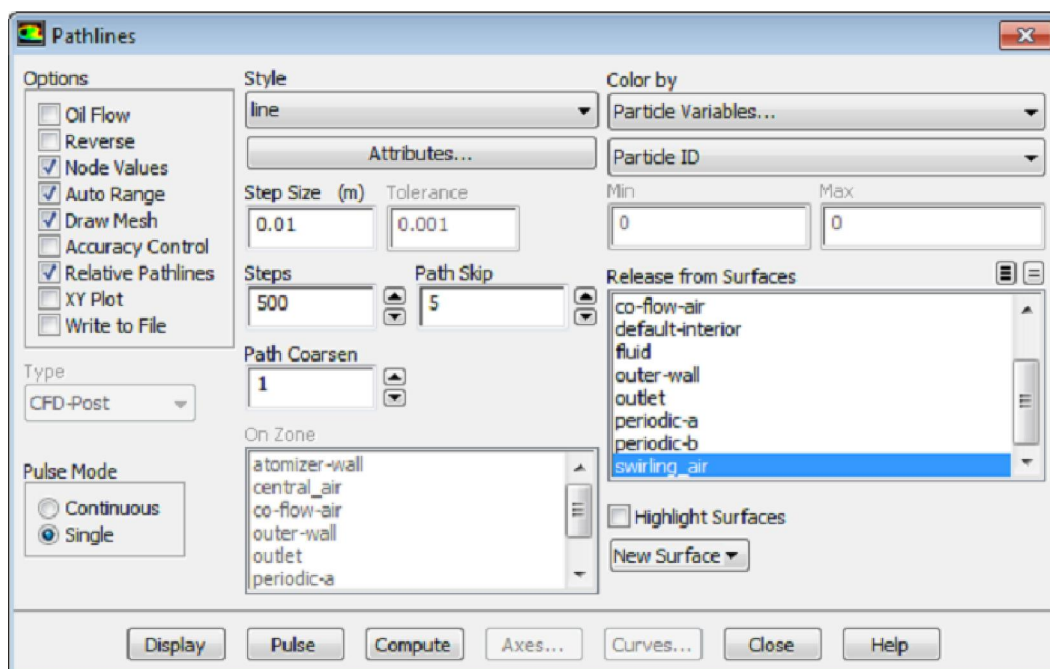


Рисунок 3. 29- Окно построения линий тока **Pathlines**

Линии тока будут строиться из центров граней, образующих данную поверхность. Для удобства восприятия в поле **Path Skip** укажем 5. Это значит, что отображаться будет только каждая пятая линия тока. В разделе **Options** включим опцию **Draw Mesh**. Откроется окно дополнительного отображения поверхностей (рисунок 3.25). Закроем его, не меняя настроек. Нажмем кнопку **Display** для отображения линий тока. В графическом окне будут построены линии тока газа, выходящего из кольцевого сопла, и поверхность форсунки (см. рисунок 3.30).

По линиям тока видно, что газ выходит из кольцевого сопла с закруткой, по мере развития струи величина закрутки уменьшается. Анализ визуализированных результатов позволяет сделать вывод, что полученная картина течения качественно правильна, так что мы можем переходить к следующему этапу.

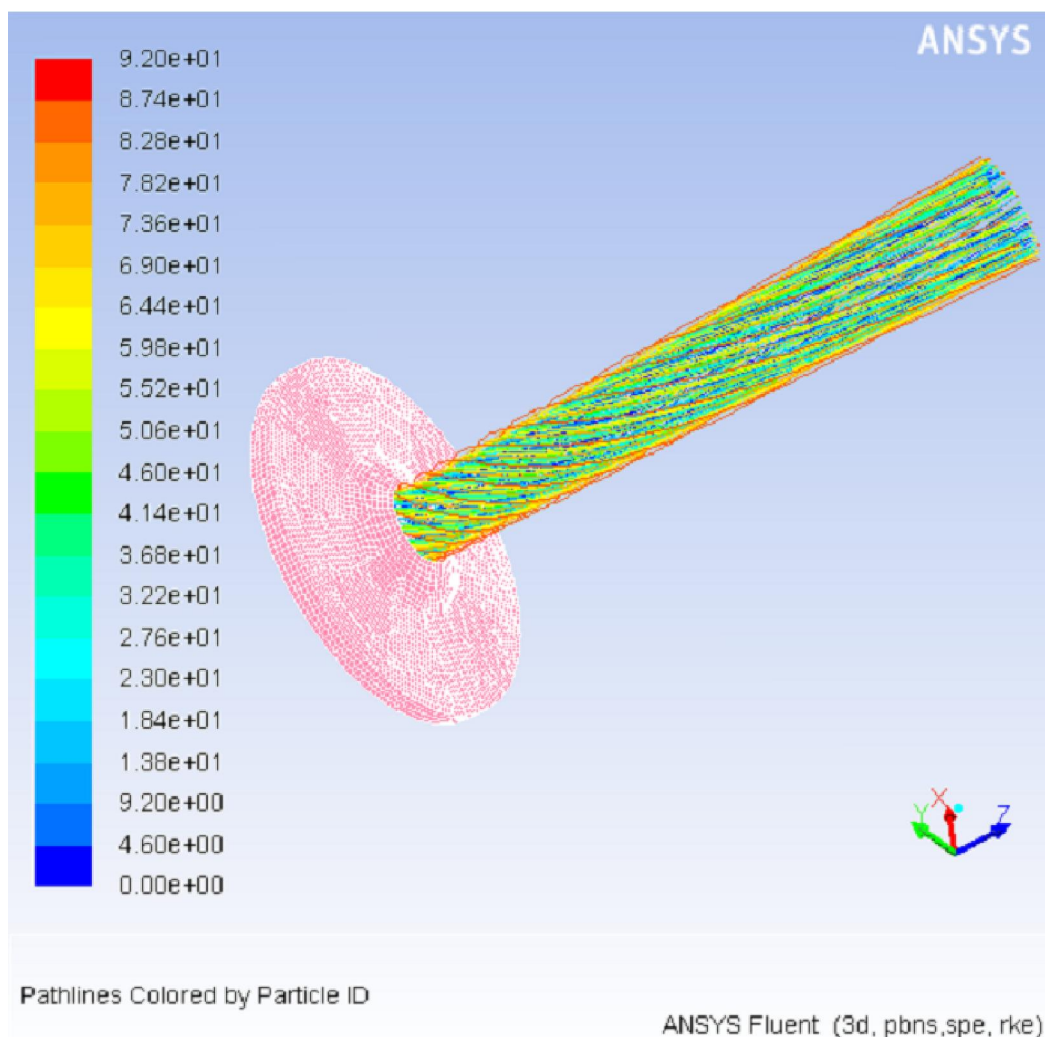


Рисунок 3. 30 - Линии тока газа, подаваемого через кольцевое сопло

3.5 Формирование процесса численного решения для двухфазного течения

На втором этапе мы добавим к течению газа капли метанола, которые будут дробиться и испаряться. Для этого вернемся к панели **Models** и подключим модель лагранжевой дисперсной фазы:

 **Models** →  **Discrete Phase** → **Edit...**

В окне параметров модели дисперсной фазы (см. рисунок 3. 31) в разделе **Interaction** включим опцию **Interaction with Continuous Phase** (взаимодействие со сплошной фазой). Она означает, что мы будем рассматривать двухстороннее межфазное взаимодействие, т.е. не только сплошная фаза (газ) оказывает влияние на движение дисперсной фазы (капель), но и движение дисперсной фазы оказывает обратное влияние на течение сплошной фазы.

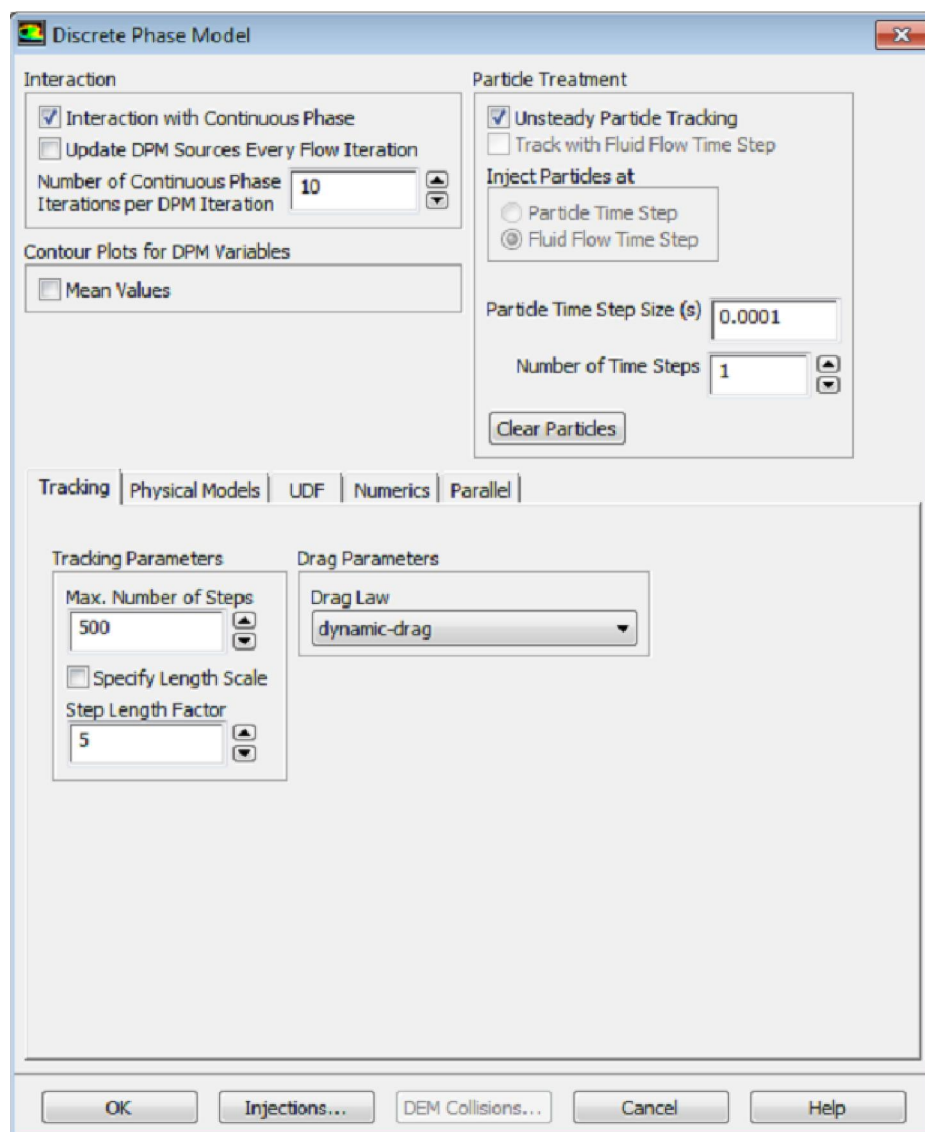


Рисунок 3. 31 - Параметры модели дисперсной фазы, вкладка **Tracking** (построение траекторий)

Примечание : параметр *Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration* указывает, сколько эйлеровых итераций (итераций расчета течения газа) делается между лагранжевыми итерациями (итерациями построения траекторий капель). Опция *Update DPM Sources Every Flow Iteration* указывает, что значения источников межфазного взаимодействия нужно обновлять на каждой эйлеровой итерации. Она обычно используется при сильной взаимосвязи течения двух фаз. При этом как правило также уменьшают значение параметра *Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration*.

В разделе **Particle Treatment** включим опцию **Unsteady Particle Tracking** (нестационарное построение траекторий).

Примечание : ANSYS Fluent позволяет выбирать между двумя режимами построения траекторий частиц дисперсной фазы. По умолчанию используется стационарный режим, когда за одну лагранжеву итерацию (т.е. итерацию расчета траекторий) строится полная траектория частицы: от места впрыска до выхода из расчетной области или оседания на стенке. Такой режим используется в случае, если нас не интересует конкретное положение частицы внутри расчетной области, а интересует, например, покидают ли частицы расчетную область или оседают на стенках. Вторым режимом – нестационарным. При этом за одну лагранжеву итерацию строится только часть траектории для заданного отрезка времени. При этом у нас в результате решения будет информация о мгновенных положениях отдельных частиц. Некоторые физические модели (например, модель вторичного распада капель) можно использовать только при нестационарном режиме расчета траекторий.

После включения режима нестационарного расчета траекторий появляется возможность указать шаг по времени для построения траекторий, **Particle Time Step Size (s)**. В соответствующем поле введем **0.0001**.

Примечание: Particle Time Step Size – это продолжительность отрезка времени на одной лагранжевой итерации, а не шаг численного интегрирования уравнений движения капель! Шаг численного интегрирования выбирается автоматически в соответствии с опциями в разделе **Tracking Parameters**. Параметр **Max. Number of Steps** отвечает за максимальное число шагов интегрирования внутри интервала времени **Particle Time Step Size**. Параметр **Step Length Factor** отвечает за выбор величины шага интегрирования. За один шаг интегрирования частица должна проходить расстояние не более чем размер ячейки расчетной сетки (определяемый как корень кубический из объема), в которой она в данный момент находится, деленный на **Step Length Factor**. В рамках одной лагранжевой итерации можно сделать несколько «глобальных» шагов продолжительностью **Particle Time Step Size**. За это отвечает параметр **Number of Time Steps**. Такая возможность нужна для настройки баланса между точностью и скоростью расчета, т.к. некоторые вычисления (например,

обновление значений коэффициентов сопротивления капель в зависимости от числа Рейнольдса, или расчет распада капель) происходят не в начале лагранжевой итерации, а в начале каждого интервала

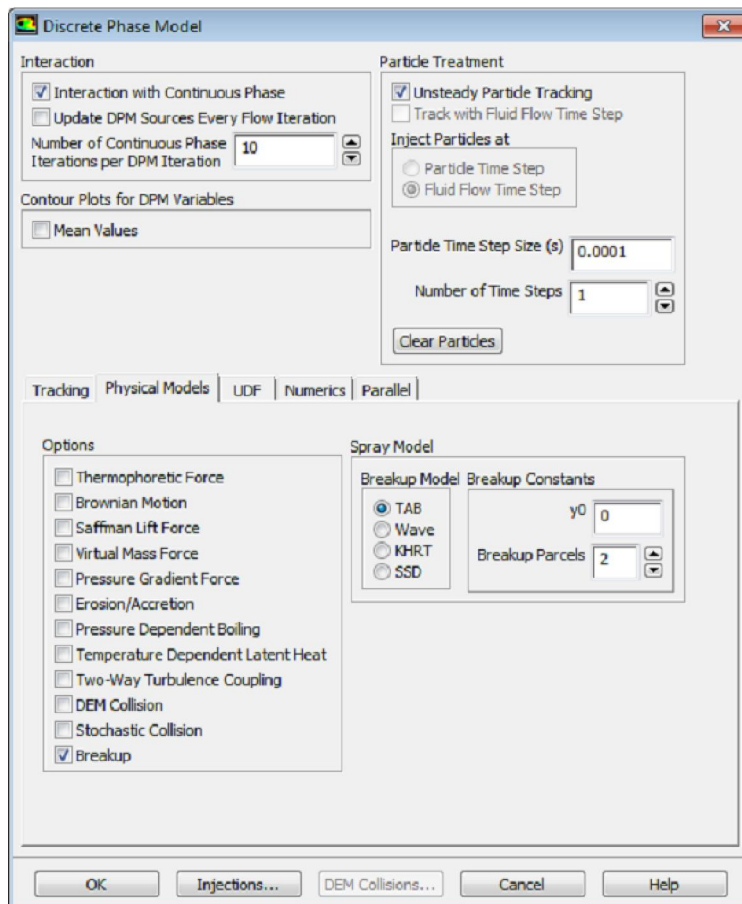


Рисунок 3.32 - Параметры модели дисперсной фазы, вкладка **Physical Models** (дополнительные физические модели)

в списке законов сопротивления (**Drag Law**) динамический закон сопротивления **dynamic-drag**. Этот закон используется в паре с моделями распада **TAB**, и учитывает изменению формы капли в зависимости от числа Рейнольдса. Для указания условий впрыска капель нажмем кнопку **Injections...** Откроется окно управления местами впрыска (рисунок 3. 33).

лагранжевой итерации, а в начале каждого интервала **Particle Time Step Size**.

Перейдем на вкладку **Physical Models** (см. рисунок 3.32) и в разделе **Options** включим модель вторичного распада капель – опцию **Breakup**. По умолчанию используется модель распада на основе аналогии Тейлора, модель **TAB**.

Вернемся на вкладку **Tracking** (рисунок 3. 31) и в разделе **Drag Parameters** (параметры силы сопротивления) выберем

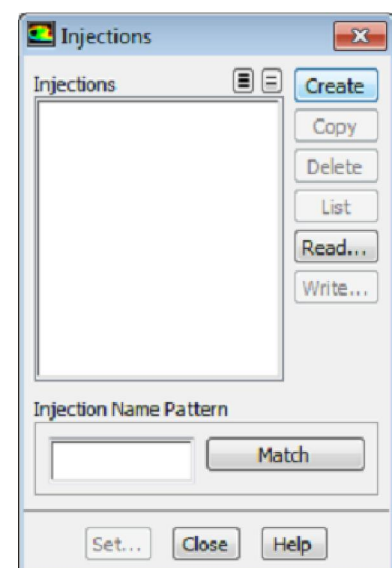


Рисунок 3.33- Окно управления местами впрыска **Injections**

Нажмем в нем кнопку **Create** для создания нового места впрыска. Откроется окно параметров впрыска (рисунок 3. 34).

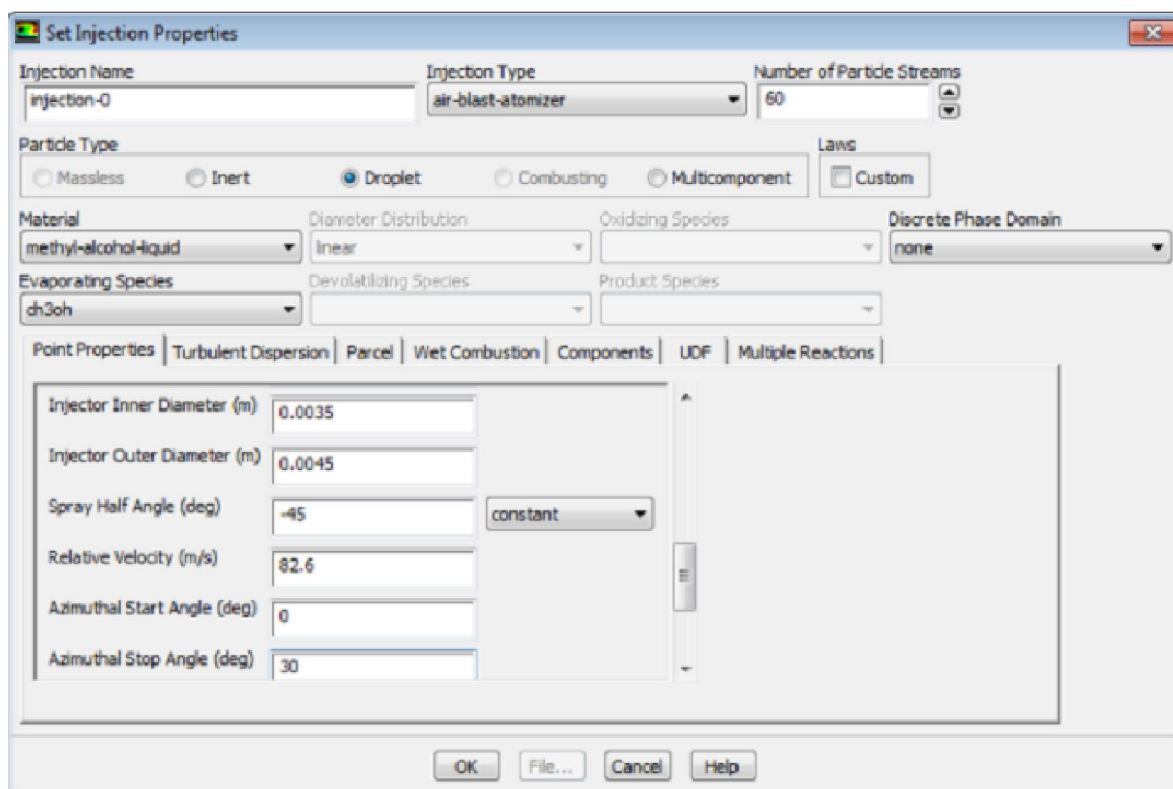


Рисунок 3. 34 - Окно параметров впрыска

Вместо прямого задания параметров впрыска (начальных точек, скоростей, распределения размеров капель и т.п.) мы воспользуемся встроенной моделью пневматической форсунки. Для этого в списке **Injection Type** выберем **air-blast-atomizer**. В поле **Number of Particle Streams** укажем число групп капель: **60**.

Примечание: Число групп капель с одной стороны должно быть достаточно велико, чтобы адекватно описать распределение размеров. С другой стороны, чем больше число групп, тем больше вычислительные затраты. Следует учесть, что при выбранном нами нестационарном режиме расчета траекторий указанное число групп будет вводиться в расчетную область на каждом «глобальном» шаге *Particle Time Step*.

В разделе **Particle Type** выберем вариант **Droplet** (капля, т.е. испаряемая частица). В списке веществ **Material** выберем **methyl-alcohol-liquid** (метанол в жидком виде). В списке **Evaporation Species** выберем **ch3oh**.

Evaporation Species – это компонент сплошной фазы, который образуется при испарении капель.

На вкладке **Point Properties** задаются параметры выбранной модели впрыска.

Примечание: при использовании встроенной модели пневмофорсунки капли впрыскиваются в секторе кольца, для которого нужно задать плоскость (через точку и нормаль), угловой размер, внутренний и внешний радиус (соответствуют внутреннему и внешнему радиусу кольцевого сопла). Абсолютная скорость капель не задается явно, она вычисляется на основе местной скорости газа в месте впрыска и указанной относительной скорости. Размер капель также не задается явно, а вычисляется на основе эмпирических соотношений.

Укажем с использованием вкладки **Point Properties**:

- в поле **Z-Position (m)**: **0.0015** (соответствует выходу из кольцевого сопла);
- в поле **Temperature (k)**: **263** (впрыскиваемый метанол охлажден до -10°C);
- в поле **Flow Rate (kg/s)**: **8.5e-5** (1/12 полного массового расхода метанола через форсунку);
- т.к. мы выбрали нестационарный режим расчета траекторий, то нужно указать время работы форсунки через время начала впрыска (**Start Time**) и время окончания впрыска (**Stop Time**), в поле **Stop Time (s)** укажем **100** (это много больше времени расчет траекторий, т.е. форсунка будет работать все время);
- в поле **Injector Inner Diameter (m)**: **0.0035** (внутренний выходной диаметр кольцевого сопла);
- в поле **Injector Outer Diameter (m)**: **0.0045** (внешний выходной диаметр кольцевого сопла);
- в поле **Spray Half Angle (deg)**: **-45** (знак минус означает, что капли вылетают к оси форсунки);
- в поле **Relative Velocity (m/s)**: **82.6** (скорость капель относительно потока газа);
- т.к. мы рассматриваем не полную форсунку, а сектор 30° , то это нужно явно указать в параметрах модели впрыска, через параметры **Azimuthal Start Angle** и **Azimuthal Stop Angle**; наша расчетная модель построена таким образом, что

боковые поверхности сектора соответствуют значениям угловой координаты 0 и 30 (отсчитывается от плоскости XY), поэтому в поле **Azimuthal Stop Angle (deg)** укажем **30**.

После закрытия окна параметров впрыска будет показано окно с сообщением о том, что обновился список доступных веществ (см. рисунок 3.8). Закрыв это окно, перейдем на панель **Materials**. Там в списке веществ появился новый раздел **Droplet Particle**, а в нем **methyl-alcohol-liquid**. Для корректной работы некоторых физических моделей (например, распада капель, испарения капель) нужно скорректировать свойства этого вещества:

 **Materials** →  **methyl-alcohol-liquid** → **Create/Edit...**

В окне свойств вещества (рисунок 3.35) в поле **Viscosity (kg/m-s)** (вязкость) укажем **0.0056** (значение вязкости жидкого метанола при -10°C). Нажмем кнопку **Change/Create** и закроем окно свойств вещества.

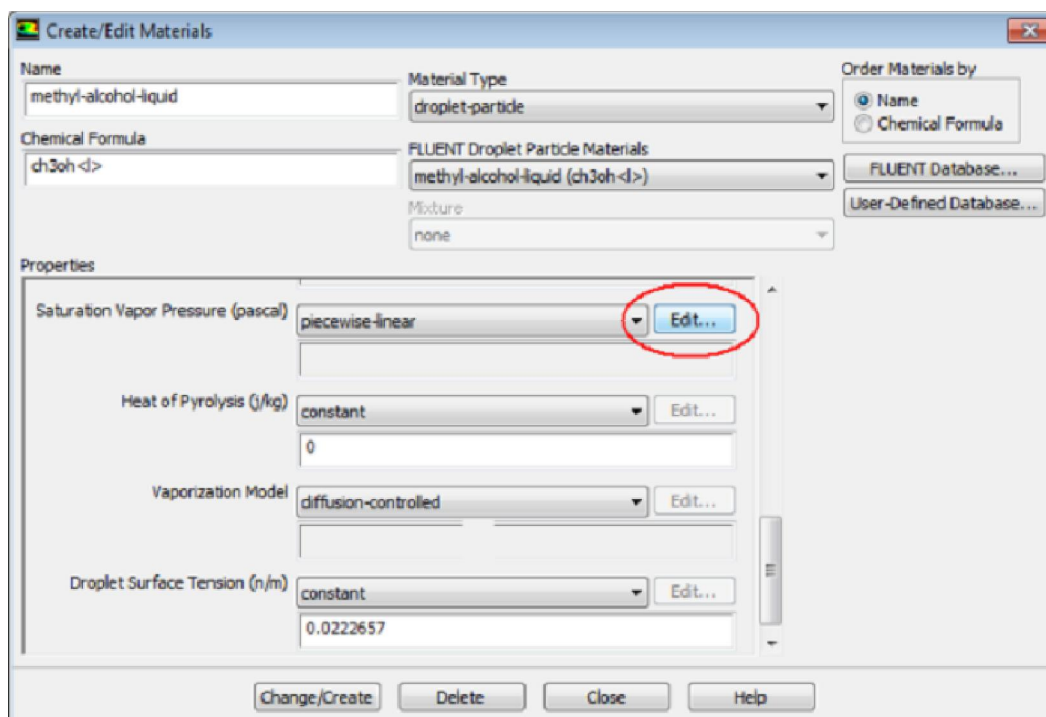


Рисунок 3.35 - Окно свойств вещества капли

Перед запуском решения с впрыском капель скорректируем параметры решателя. На панели **Solution Controls** (рисунок 3.36) уменьшим коэффициент релаксации для источников членов, связанных с межфазным взаимодействием. В поле **Discrete Phase Source** укажем **0.1**.

Контроль процесса сходимости будем осуществлять не по невязкам уравнений, а по дополнительным параметра мониторинга: концентрации паров метанола на выходе и скорости испарения капель. Для отключения автоматической остановки решения по достижении заданного значения невязок перейдем на панель **Monitors** (рисунок 3. 37). В окне параметров контроля невязок (рисунок 3.38) выберем в списке **Convergence Criterion: none**.

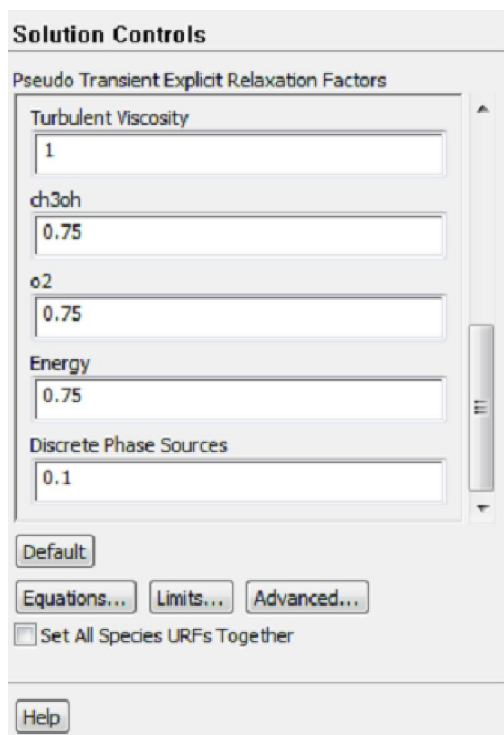


Рисунок 3. 36 Панель управления решением **Solution Controls**

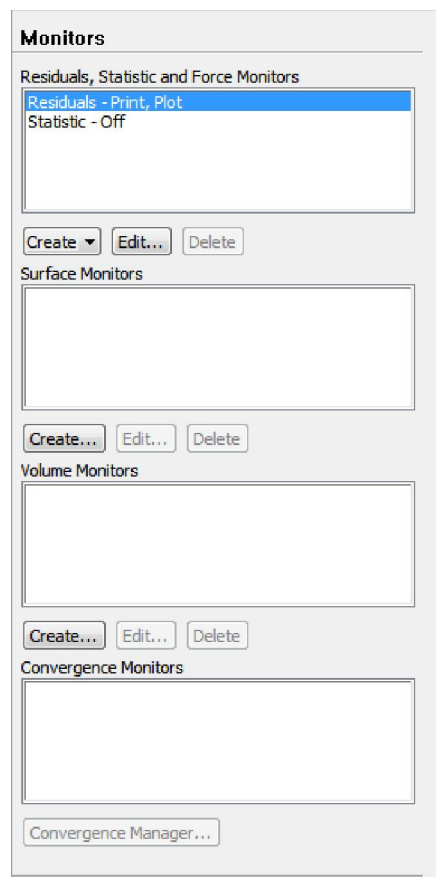


Рисунок 3.37- Панель контроля решения **Monitors**

Вернувшись к панели **Monitors**, нажмем кнопку **Create...** под пустым списком **Surface Monitors**. Откроется окно создания поверхностного параметра мониторинга (рисунок 3.39). В этом окне в списке **Report Type** выберем **Mass-Weighted Average** (среднее по поверхности с весовым коэффициентом, равным локальному потоку массы). Выберем группу переменных **Species...** (компоненты), а в ней переменную **Mass Fraction of ch3oh** (массовая концентрация паров

метанола). В списке **Surfaces** выберем поверхность, по которой будет проводиться усреднение: **outlet**. В разделе **Options** выберем опцию **Plot** для построения графика изменения параметра мониторинга в процессе решения.

Monitors → Residuals → Edit...

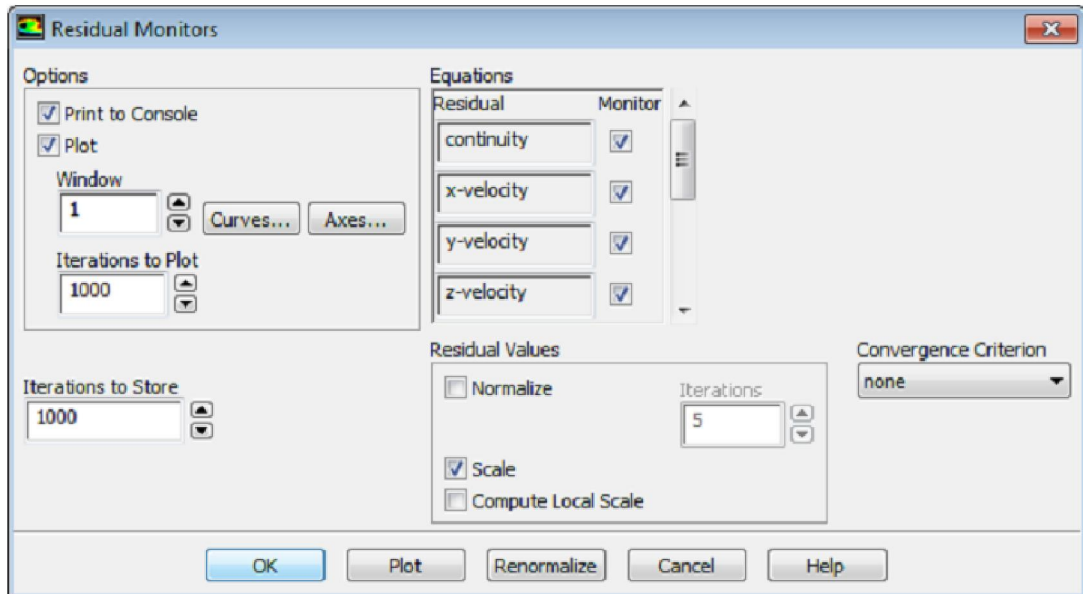


Рисунок 3. 38- Окно параметров контроля невязок

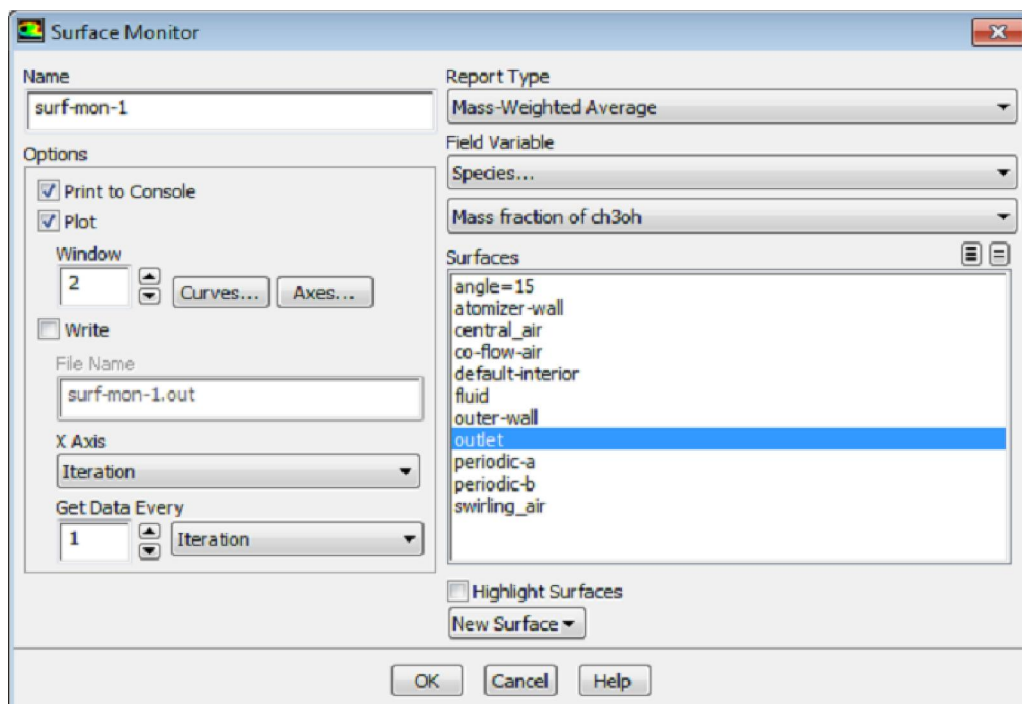


Рисунок 3.39 - Окно задания поверхностного параметра мониторинга

Схожим образом задается объемный параметр мониторинга. Нажмем на кнопку **Create...** под пустым списком **Volume Monitors**. Откроется окно создания объемного параметра мониторинга (рисунок 3.40). В этом окне в списке **Report Type** выберем **Sum** (сумма по всем ячейкам). Выберем группу переменных **Discrete Phase Sources...** (источниковые члены, связанные с взаимодействием с дисперсной фазой), а в ней переменную **DPM Mass Source** (источник массы, вызванный испарением капель метанола). В списке **Cell Zones** выберем зону, по которой будет проводиться суммирование: **fluid** (это вся наша расчетная область). В разделе **Options** выберем опцию **Plot** для построения графика изменения параметра мониторинга в процессе решения.

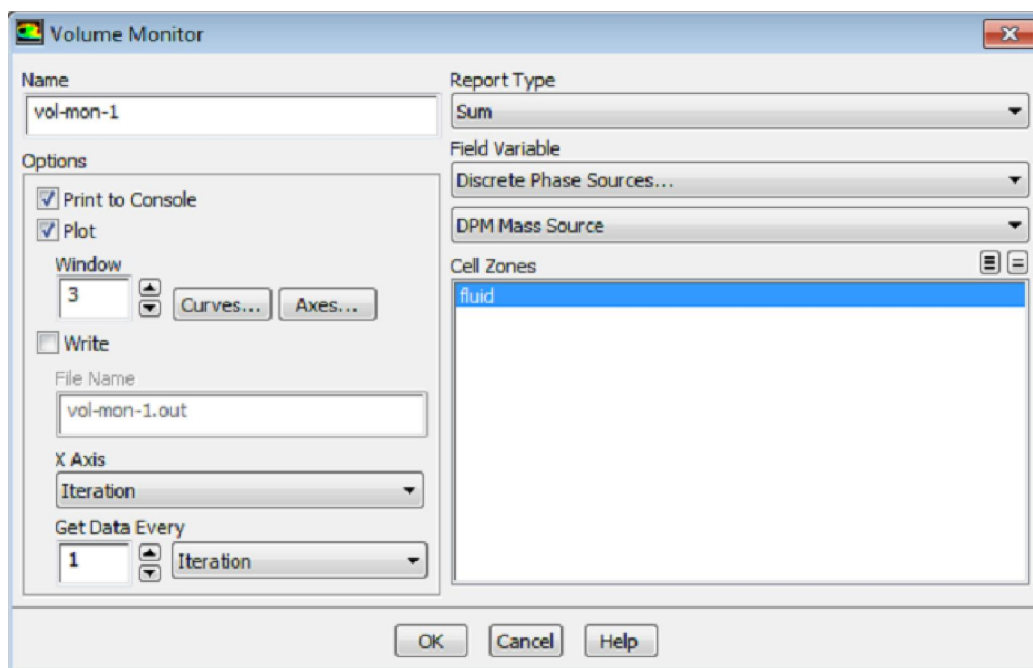
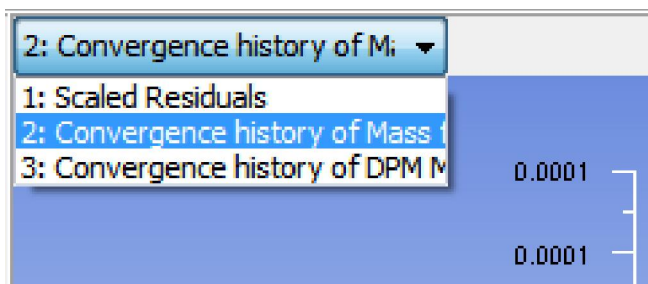


Рисунок 3.40 - Окно задания поверхностного параметра мониторинга

Для запуска решения с каплями перейдем к панели **Run Calculation**, увеличим число итераций **Number of Iterations** до **1500**, и запустим расчет кнопкой **Calculate**. В ходе расчета можно переключаться между различными графиками (невязки уравнений, концентрация паров на выходе, скорость испарения) с помощью выпадающего списка в левом верхнем углу графического окна (см. рис. 38).



1 – невязки, 2 – концентрация паров на выходе,
3 – скорость испарения

Рисунок 3.41- Список графиков

За указанное нами число итераций параметры мониторинга выйдут на примерно постоянные значения (см. рисунки 3.42 и 3.43), т.е. процесс в целом выйдет на квазистационарный режим.

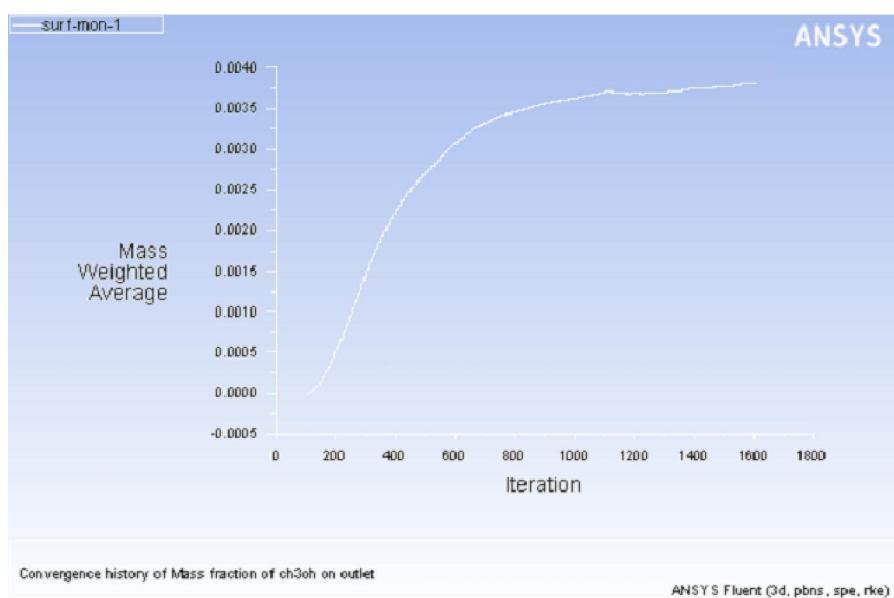


Рисунок 3. 42- Изменение средней концентрации паров на выходе в ходе решения

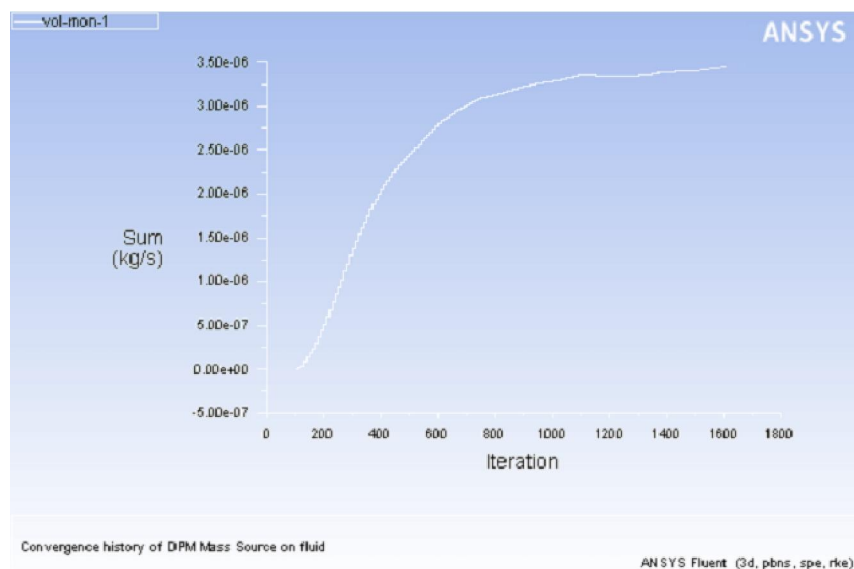


Рисунок 3. 43. Изменение скорости испарения капель в ходе решения

Перед визуализацией результатов решения целесообразно сохранить файл постановки задачи и результатов:

File -> Write -> Case & Data...

Предыдущие файлы, соответствующие течению без частиц, сохранялись под именем *sector* (*sector.cas* и *sector.dat*). Новым файлам лучше дать другое имя, например *sector2*.

Отобразить мгновенное распределение капель на момент окончания решения (рисунок 3. 44):

Graphics and Animations → Particle Tracks → Set Up...

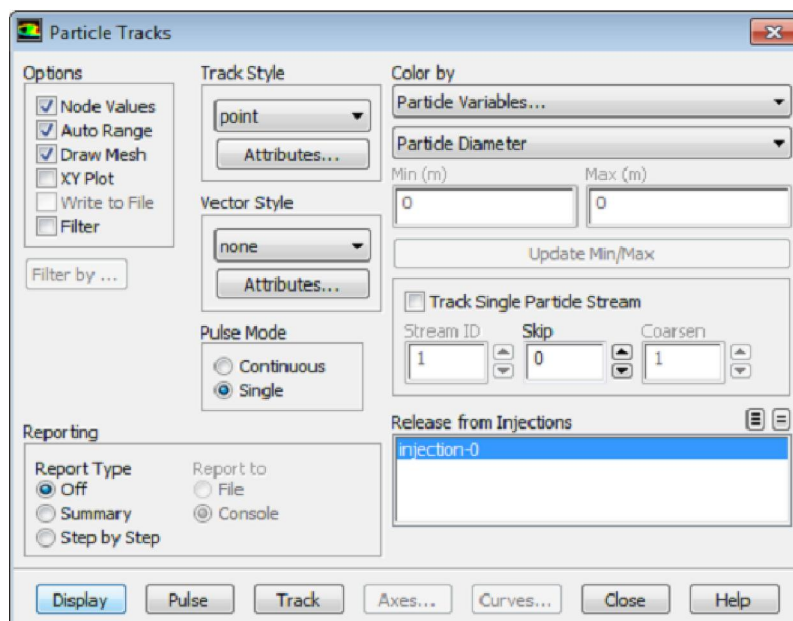


Рисунок 3. 44- Окно отображения капель

В разделе Options включим опцию **Draw Mesh**, чтобы кроме облака капель получить также отображение форсунки (открывшееся окно **Mesh Display**, рисунок 3.25, можно сразу закрыть, так как ранее мы уже сделали все необходимые настройки). В разделе

Color by выберем группу переменных **Particle Variables...** (переменные, относящиеся к каплям), а в ней переменную **Particle Diameter** (диаметр капли). Т.е. капли будут раскрашены в соответствии с диаметром. В списке **Release from Injections** выберем **injection-0**. Отрисуем распределение капель кнопкой **Display**.

Примечание: ANSYS Fluent предоставляет различные возможности для отображения капель. Например, капли разного диаметра можно изображать маркерами разного размера. Для этого нужно в разделе **Track Style** выбрать

sphere вместо *point*, нажать кнопку **Attributes** и в появившемся окне (рисунок 3.45) выбрать в разделе **Size by** группу переменных **Particle Variables...**, а в ней переменную **Particle Diameter**. При этом возможно потребуется настроить масштабный коэффициент **Scale**, иначе слишком мелкие капли просто не будут отрисованы. Цвет капель, задаваемый в окне **Particle Tracks**, при этом можно использовать для отображения, например, температуры.

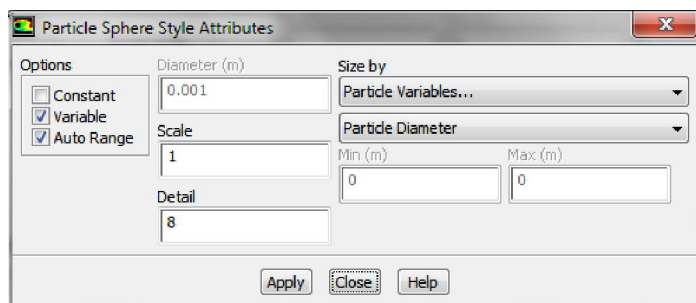


Рисунок 3. 45 - Окно настройки отображения капель в виде сфер

Если мы хотим вернуться к отображению 30-градусного сектора вместо полной форсунки, нужно вызвать окно «размножения» результатов (рисунок 3. 28):

Display -> Views... -> Periodic Repeats: [Define]

и в нем нажать кнопку **Reset**. В итоге получим картину, аналогичную представленной на рисунке 3. 46.

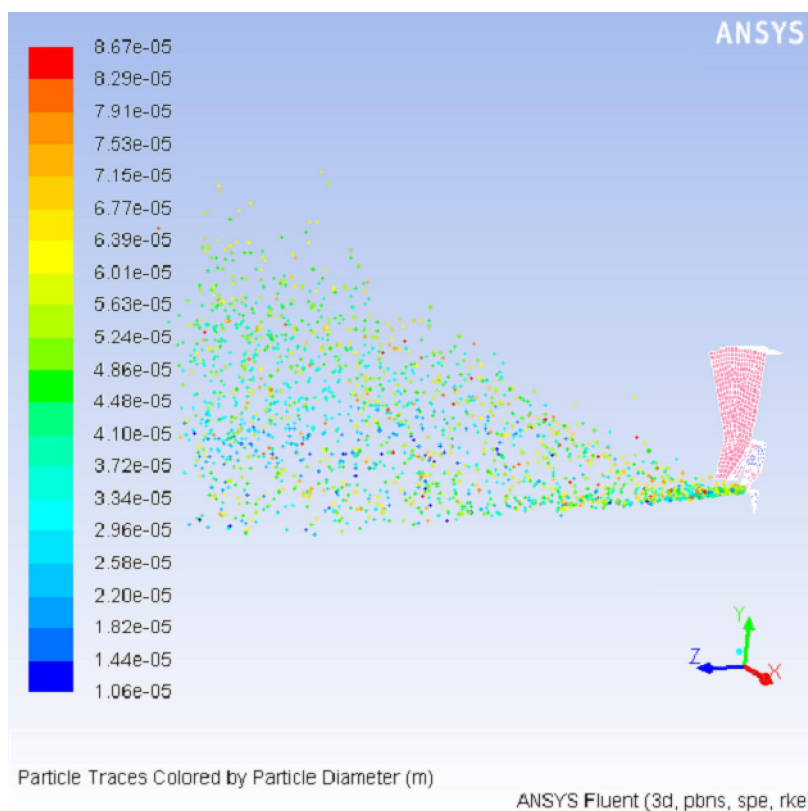


Рисунок 3.46 - Распределение капель в расчетной области; цвет капли соответствует ее диаметру

Как видно из рисунка 3.46, диапазон размеров капель достаточно широк. Самые крупные капли имеют размер около 87 микрон. Это примерно на порядок меньше ширины кольцевого сопла (ширина сопла - 0,5 мм). Как было сказано ранее, использованная нами для задания условий sprays встроенная модель пневмофорсунки использует эмпирические соотношения для расчета начального распределения размеров капель. После впрыска размер капли уменьшается в силу двух факторов: вторичного распада и испарения.

Мы можем также построить изоповерхность концентрации паров метанола, образовавшихся при испарении капель:

Surface → Iso-Surface...

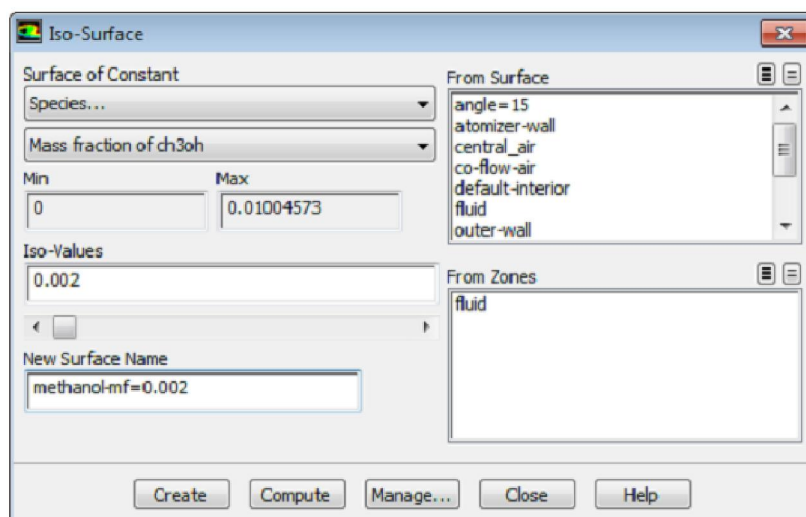


Рисунок 3. 47- Создание изоповерхности концентрации паров метанола

В окне создания изоповерхности (рисунок 3. 47) выберем в разделе **Surface of Constant** группу переменных **Species...** (компоненты), а в ней переменную **Mass fraction of ch3oh** (массовая

концентрация метанола). В поле **Iso-Values** введем значение, которому должна соответствовать изоповерхность: **0.002**. В поле **New Surface Name** можно указать имя изоповерхности, например **methanol-mf=0.002**, и завершить создание изоповерхности нажатием кнопки **Create**. Созданная поверхность появится в списке поверхностей **Surfaces** в окне **Mesh Display**:

Display -> Mesh...

Теперь изоповерхность можно выбрать для отображения вместе с уже выбранными поверхностями форсунки. Нажав в окне **Mesh Display** (рисунок 3.

25) кнопку **Colors...** можно настроить цвет, которым будет закрашена изоповерхность (рисунок 3 . 48).

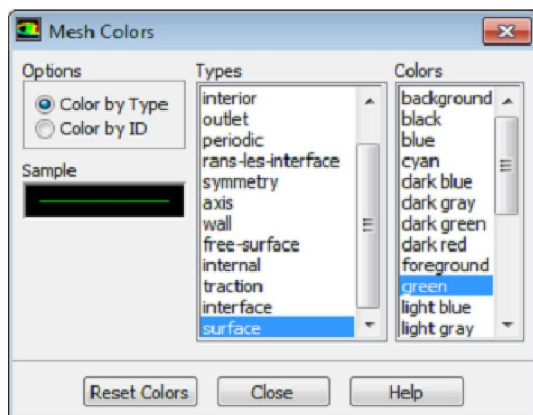


Рисунок 3.48 - Окно настройки цвета поверхностей

Для более наглядного отображения лучше снова включить «размножение» результатов, выбрав число копий **Number of Repeats** равным **6** (для отображения половины форсунки). Кроме того можно добавить источники освещения:

Diplay -> Lights...

Для этого в окне управления освещением (рисунок 3.49) надо включить опции **Light On** и **Headlight On**.

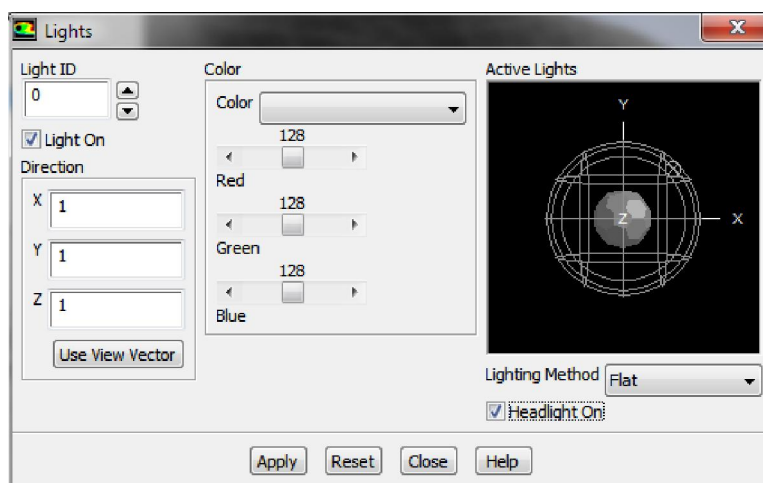


Рисунок 3. 49- Окно управления освещением

В итоге получим картину, аналогичную приведенной на рисунке. 3.50.

Мы рассмотрели задачу распыла и испарения капель в самой простой постановке. При расчете взаимодействия капель с газом мы учитывали только силу

сопротивления. В реальных расчетах необходимо учитывать целый ряд других сил, которые подключаются на вкладке **Physical Models** окна параметров лагранжевой модели дисперсной фазы (рисунок 3. 32), например:

- боковую силу (силу Сэффмена, Saffman Lift Force), появляющуюся при наличии поперечного градиента скорости в несущем потоке газа;
- силу присоединенных масс (Vistual Mass Force), проявляющуюся при резком ускорении или торможении капель (например, при впрыске с большими относительными скоростями);
- силу, связанную с наличием продольного градиента давления в несущем потоке газа (Pressure Gradient Force).

При задании параметров впрыска можно также учесть (на вкладке **Turbulent Dispersion** окна параметров впрыска, рисунок 3.34) дисперсию капель, вызванную турбулентностью несущего потока газа.

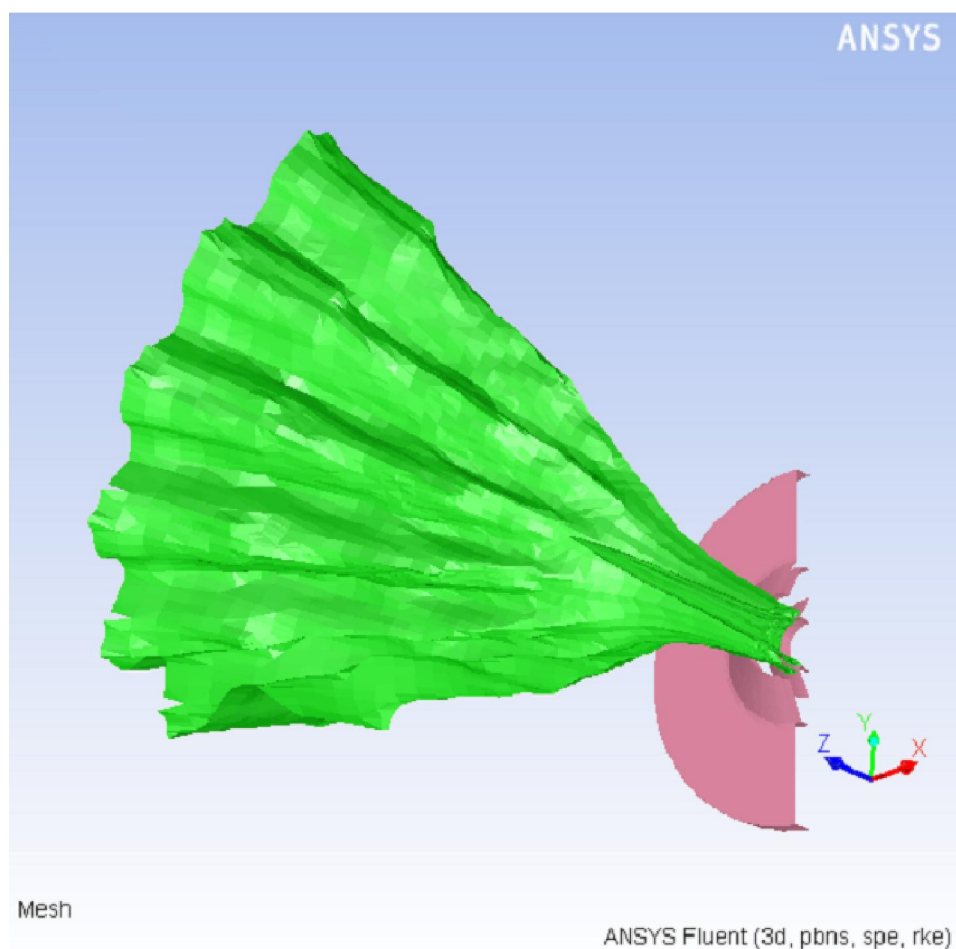


Рисунок 3.50 - Исоповерхность концентрации паров метанола

4 Формирование в Ansys Fluent CFD- модели течения генераторного газа на выходе из форсуночной головки камеры сгорания ЖРД

4.1 Создание проекта в среде ANSYS Workbench

Создание проекта Fluid Flow(Fluent) начинается с запуска ANSYS Workbench (рисунок 4.1)

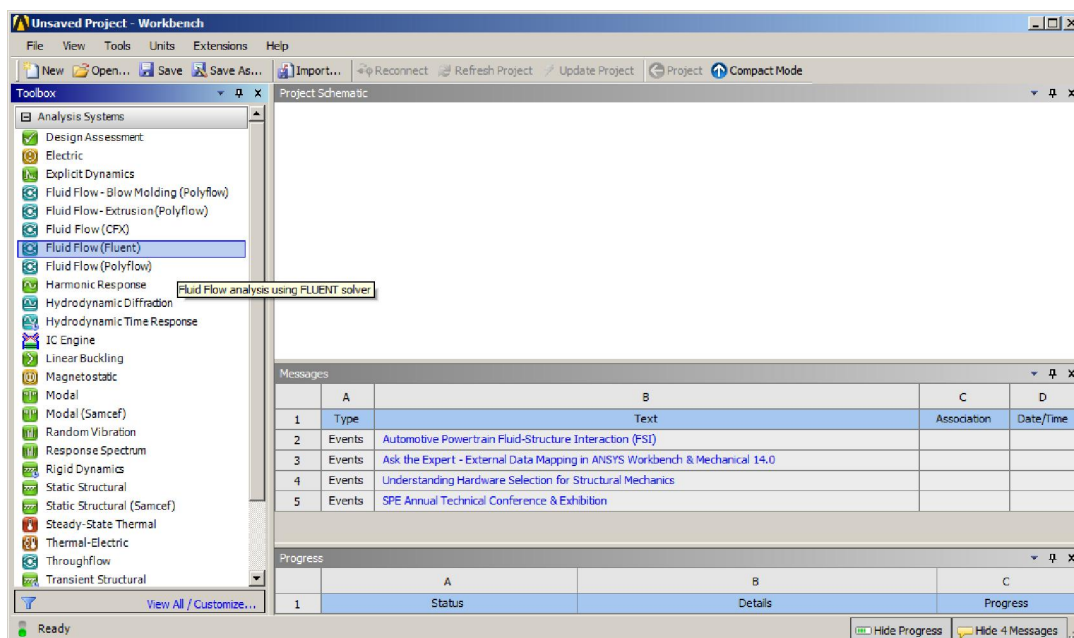


Рисунок 4.1 – Итерфейс и рабочее окно ANSYS Workbench.

После загрузки программы и появления на экране интерфейса среды Workbench

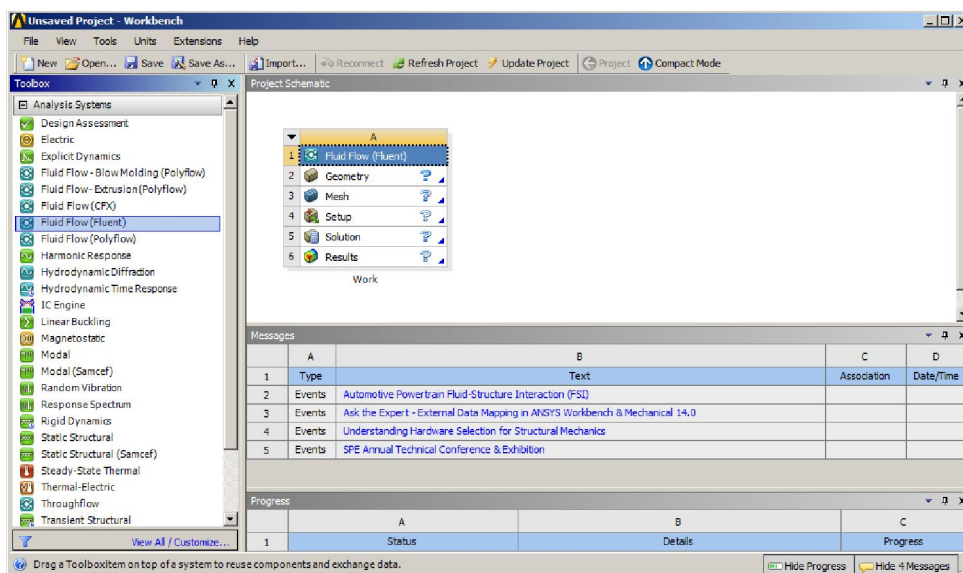


Рисунок 4.2 – Создание проекта в ANSYS Workbench

приступим к работе: меню Toolbox слева, выберем пункт **Fluid Flow (Fluent)**, и дважды кликнем по нему. Результат этой операции показан на рисунке 4.2 (автоматически

создан проект под именем **Fluid Flow(Fluent)**, при этом предлагается присвоить проекту другое имя). После этого необходимо сохранить проект, нажав кнопку **Save As** или выбрав в меню **File > Save As**. Далее в диалоговом окне указать имя файла и путь, куда будет сохранен проект.

4.2 Формирование геометрической модели

После того как проект создан и сохранен, можно приступить к созданию геометрической модели камеры ЖРД, описание которого было приведено в

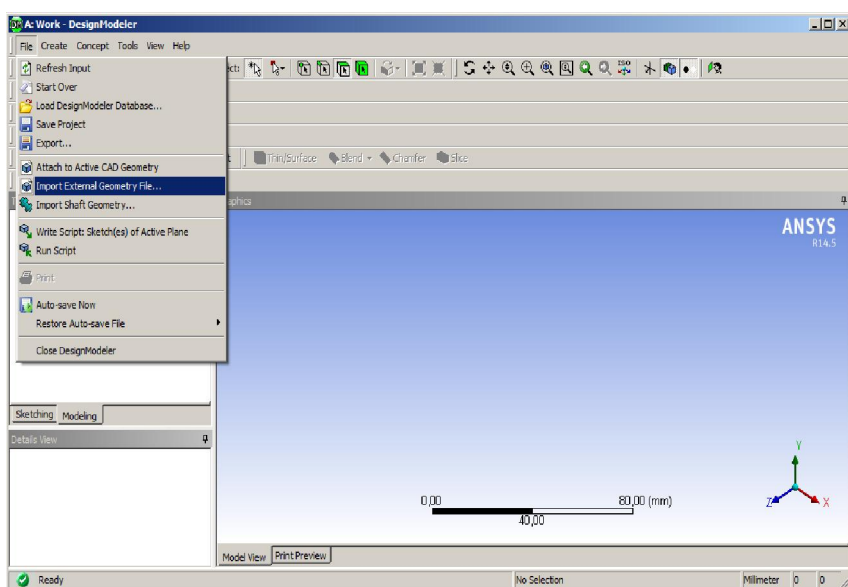


Рисунок 4.3 – Интерфейс и рабочее окно модуля ANSYS DesignModeler

разделе 3. Для запуска ANSYS Design Modeler необходимо дважды щелкнуть по строке Geometry в окне Project Schematic. После небольшого ожидания запустится ANSYS DesignModeler - модуль ANSYS для создания геометрических моделей

(рисунок 4.3)

Сразу же будет предложено выбрать единицы измерения длины создаваемой геометрической модели. Для нашей геометрической модели больше всего подойдут миллиметры (рисунок 4.4).

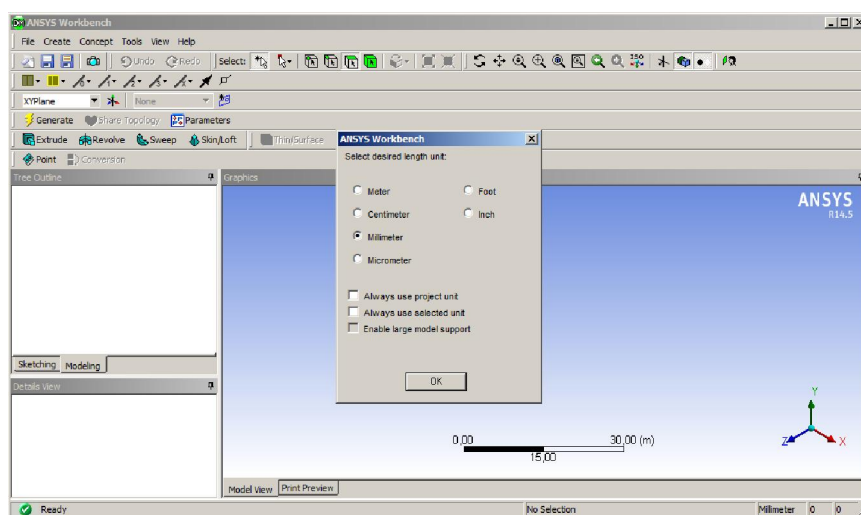


Рисунок 4.4 – Выбор единицы длины геометрической модели

После этого можно приступить непосредственно к созданию геометрической модели. Самым простым способом является импорт уже существующей модели, созданной в одном из стороннем CAD- редакторе. Сделать это можно выбрав в меню

File > Import External Geometry File.

Далее в диалоговом окне указать файл геометрической модели, поддерживаемой ANSYS DesignModeler. Ниже приведен список п форматов, одержживаемых ANSYS DesignModeler :

```
ACIS (*.sat;*.sab)
AutoCAD (*.dwg;*.dxf)
Catia [V4] (*.model;*.exp;*.session;*.dlv)
Catia [V5] (*.CATPart;*.CATProduct)
Creo Elements/Direct Modeling (*.pkg;*.bdl;*.ses;*.sda;*.sdp;*.sdac;*.sdpc)
Creo Parametric (*.prt;*.asm*)
GAMBIT (*.dbs)
IGES (*.iges;*.igs)
Inventor (*.ipt;*.iam)
JTOpen (*.jt)
Monte Carlo N-Particle (*.mcnp)
Parasolid (*.x_t;*.xmt_bin;*.x_b;*.xmt_bin)
Solid Edge (*.par;*.asm;*.psm;*.pwd)
SolidWorks (*.SLDPRT;*.SLDASM)
SpaceClaim (*.scdoc)
STEP (*.step;*.stp)
Unigraphics NX (*.prt)
```

После нажатия кнопки  импортированная гометрическая модель отобразится в рабочей области ANSYS DesignModeler. (рисунок 4.5)

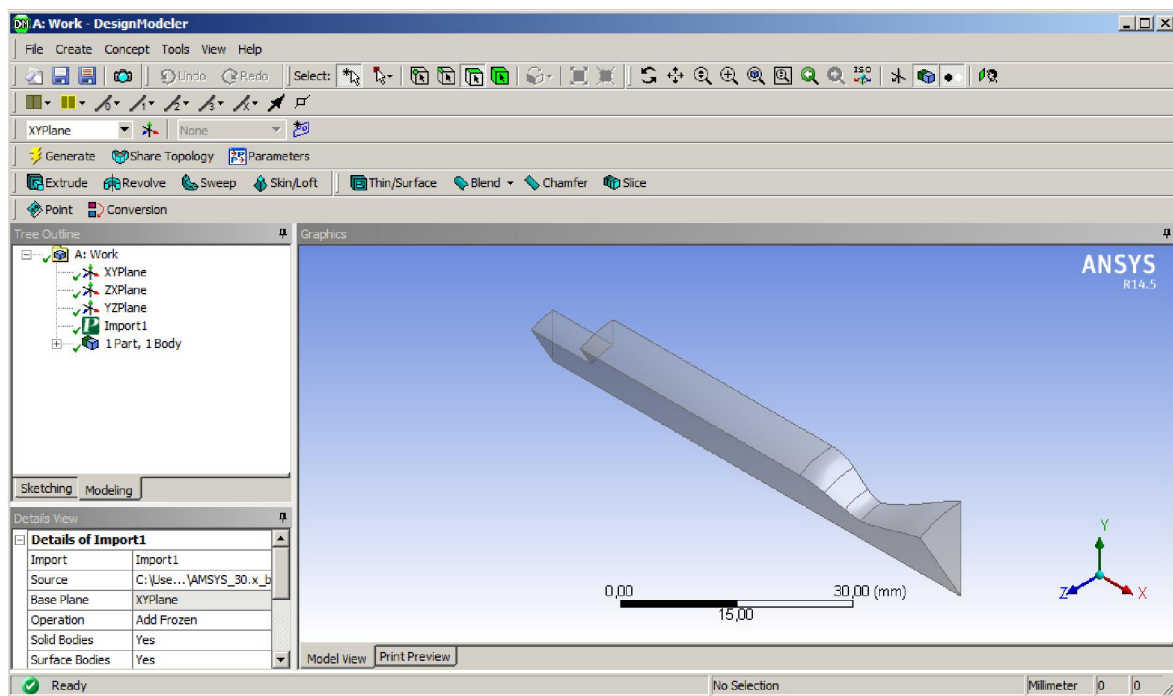


Рисунок 4.5 – Геометрическая модель сегмента камеры ЖРД в рабочем окне ANSYS DesignModeler.

Отметим, что для формирования геометрической модели можно использовать и собственные возможности ANSYS DesignModeler.

После создания геометрической модели необходимо дать имена используемым поверхностям этой модели, что необходимо для работы ANSYS Fluent.

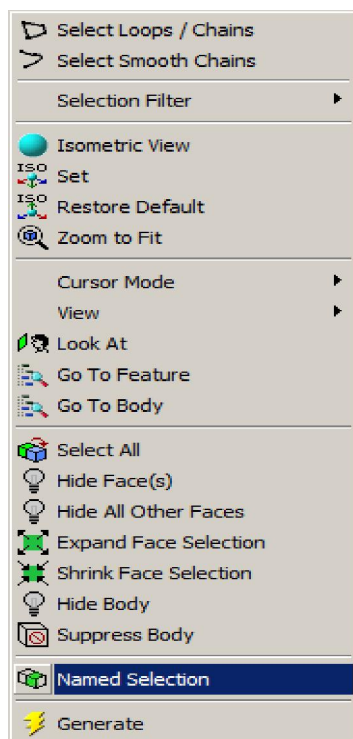


Рисунок 4.6

Покажем проведение этой процедуры применительно к поверхности среза сопла камеры ЖРД. Для этого необходимо выделить поверхность среза сопла и нажатием правой кнопки мыши в появившемся меню выбрать пункт Named Selection (рисунок 4.6). После этого необходимо указать название поверхности *outlet* и нажать кнопку Apply (рисунок 4.7)

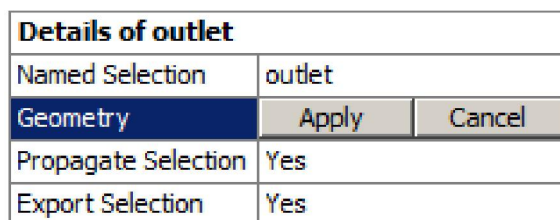
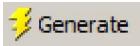


Рисунок 4.7

После чего необходимо нажать кнопку  панели, указанной на рисунке 4.6

Аналогичным способом укажем поверхность вход в камеру ЖРД, присвоив ей имя *inlet*, поверхности для впрыска капель с именем *spray*, боковым поверхностям с именами *symm* и *symm_plane*, и внешней поверхности стенки с именем *wall*. Следует обратить внимание на то, что поверхность стенки состоит из нескольких поверхностей. Что бы выделить несколько поверхностей, удерживайте клавишу CTRL.

После того как работа с геометрической моделью и наименованием поверхностей закончена, необходимо сохранить проект и закрыть ANSYS Design Modeler.

4.3 Формирование сеточной модели моделируемого объекта

Что бы запустить генератор сеточной модели ANSYS Meshing, нужно дважды щелкнуть по строке Mesh в окне Project Schematic. После загрузки и

автоматическо
го импорта
данных из
ANSYS
DesignModeler,
нам будет
доступны
интерфейс и
рабочее окно
ANSYS
Meshing
(рисунок 4.8).

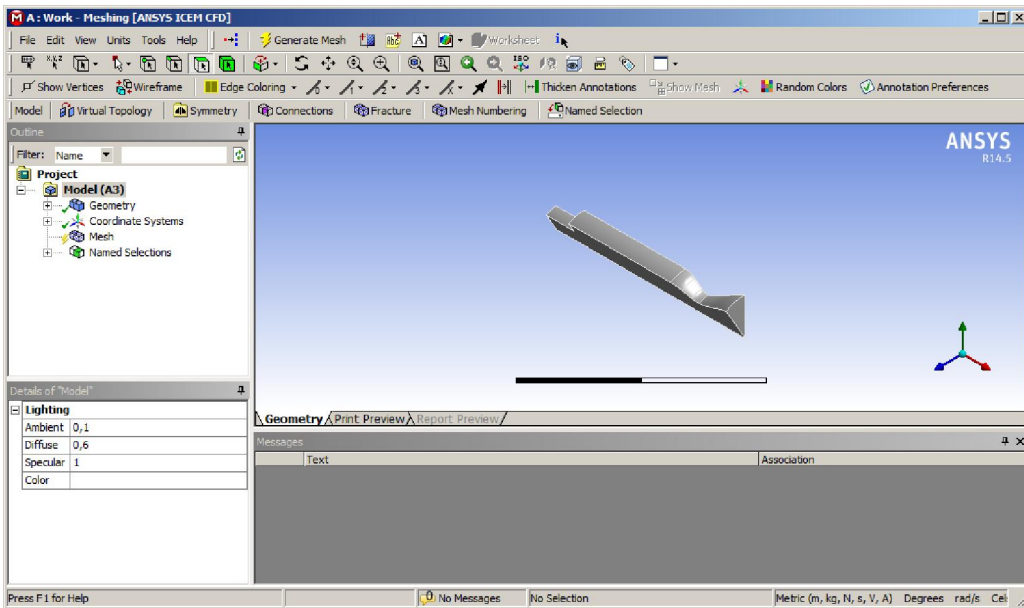


Рисунок 4.8 - Интерфейс и рабочее окно ANSYS Meshing

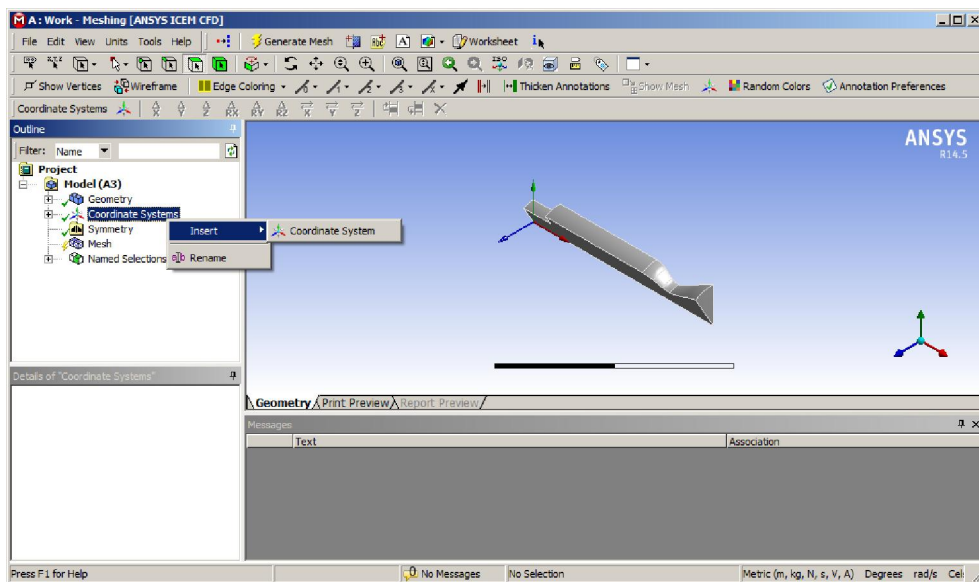


Рисунок 4.9- Задание симметрии расчетной области

Так как
расчетная область
осесимметричная
необходимо
здать эту
симметрию и
дополнительную
систему
координат для
создания этой
симметрии.

Чтобы создать систему координат, необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на **Coordinate Systems** и выбрать в меню пункт **Insert > Coordinate System** (4.9)

Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Cartesian Cylindrical

Рисунок 4.10

Origin	
Define By	Geometry...
Geometry	Geometry Selection Named Selection
Origin X	Global Coordinate System
Origin Y	0, m
Origin Z	0, m

Рисунок 4.11

Axis	Z
Define By	X Y
Orientation About Principal Axis	Z

Рисунок 4.12

Далее с помощью панели на рисунке 4.10 изменяем тип боковой поверхности на цилиндрический и ориентируем ее по глобальной системе координат, используя панель 4.11. Изменив с помощью панели на рисунке 4.12 опцию Principal Axis с X на Z, укажем правильную ориентацию продольной оси камеры ЖРД.

После этого можно вводить условие симметрии, нажав кнопки

 Symmetry и

далее  Cyclic Region. Далее, используя панель,

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Low Boundary	No Selection
High Boundary	No Selection
Definition	
Scope Mode	Manual
Coordinate System	Coordinate System
Suppressed	No

Рисунок 4.13

показанную на рисунке 4.13, в качестве поверхностей Low Boundary и High Boundary укажем боковые поверхности. В результате проведенных операций геометрическая модель примет вид, показанный на рисунке 4.14.

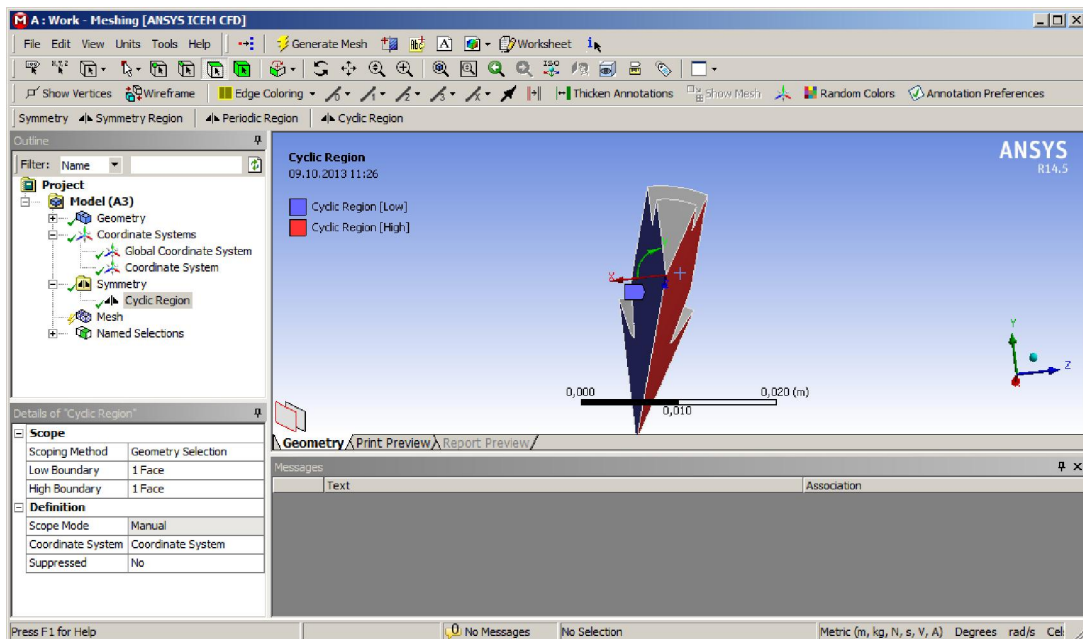


Рисунок 4.14 – Вид геометрической модели после указания типа поверхностей

Теперь приступим непосредственно к параметрам сетки. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Mesh** и выберем в меню пункт **Insert > Method** и аналогично выбираются пункты из меню **Insert > Sizing** (рисунок 4.15)

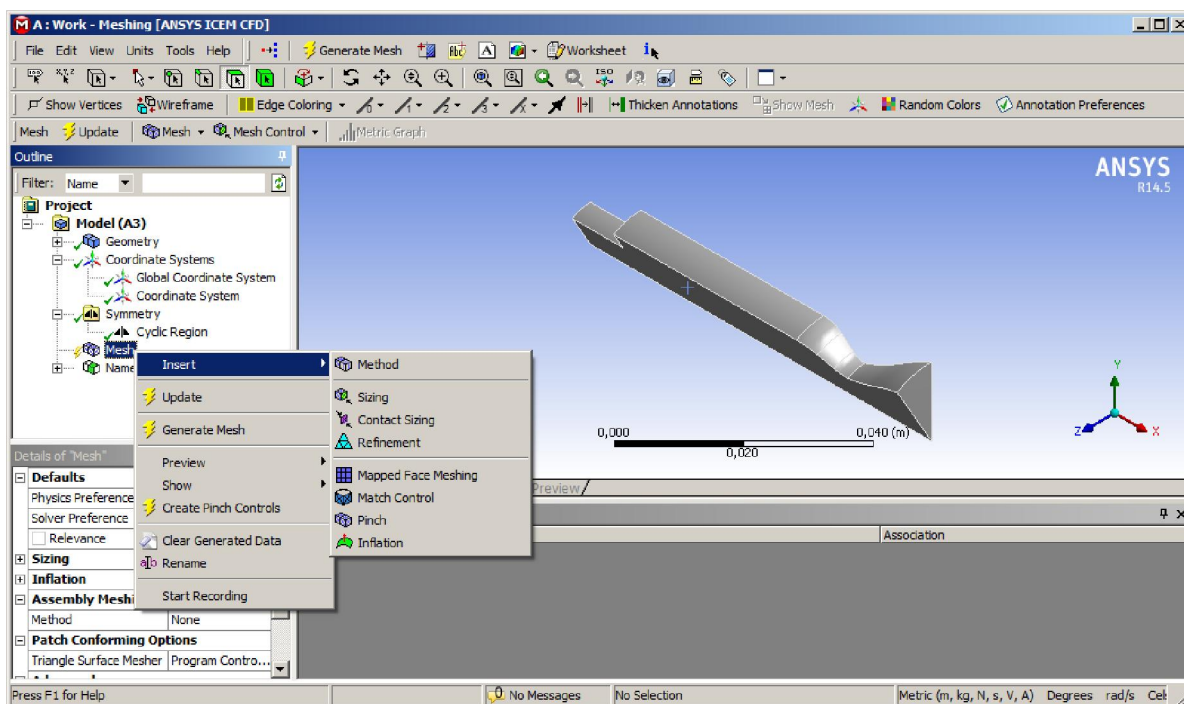


Рисунок 4.15 – Начальный этап выбора параметров сетки

Для обеих операций в качестве геометрии выберете расчетную область и нажмите кнопку **Apply**. Выбор метода зависит от типа задачи, для нашей задачи подойдут методы **MultiZone** или **Sweep**. Так как метод протяжки **Sweep** в автоматическом режиме не реализуем из за ступеньки, образуемой форсункой и камерой, используем метод **MultiZone** (для данной задачи он показывает результат, аналогичный с методом **Sweep**). Для этого, используя кнопочную панель, показанную на рисунке 4.17, выделяем **Automatic Method** и в меню **Definition** в поле **Method** выбираем **MultiZone**.

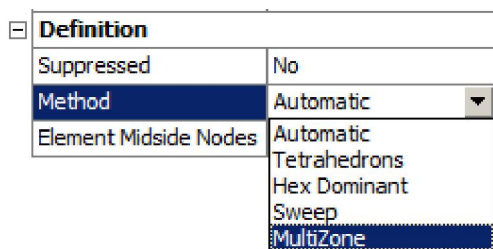


Рисунок 4.16

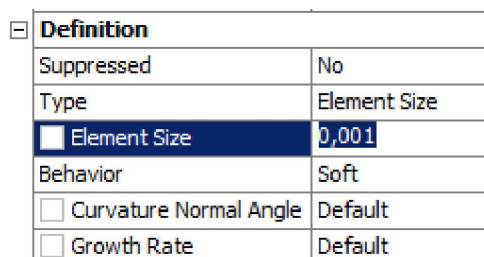


Рисунок 4.17

Размера элемента сетки выбирается из того, что с дальнейшее его уменьшение не ведет к увеличению точности результатов, однако увеличивает время расчета. Исходя из этих соображений, размер элемента сетки был подобран

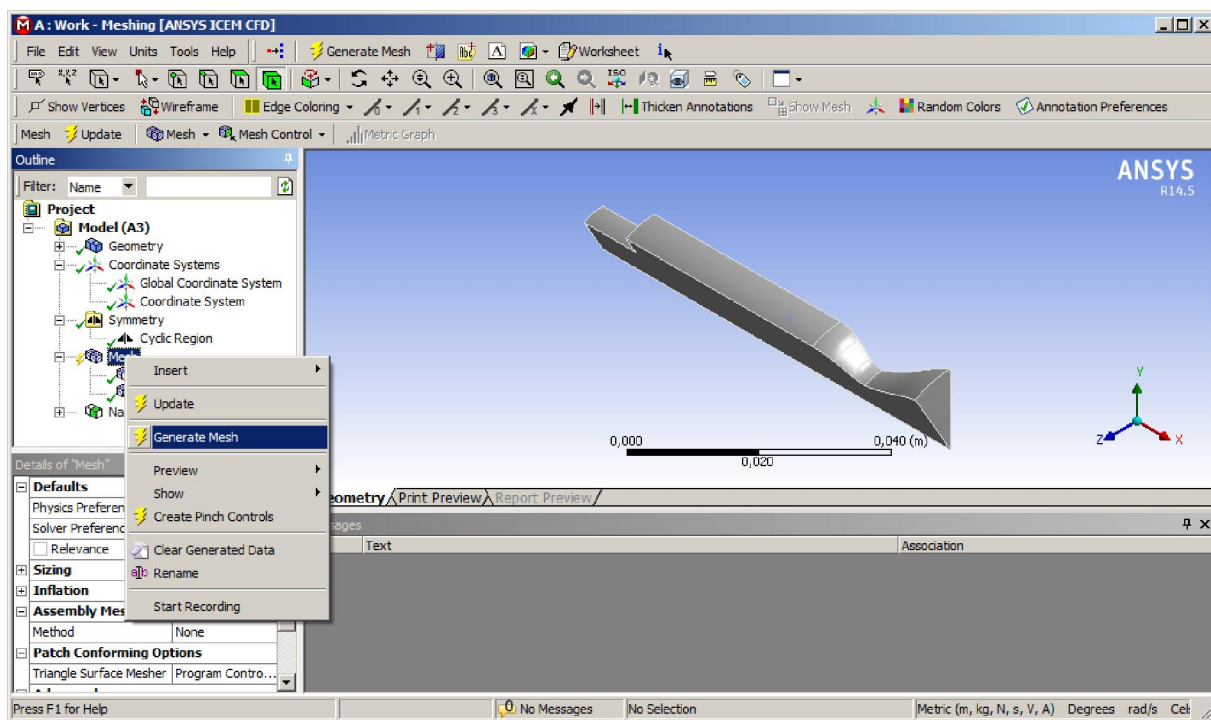



Рисунок 4.18 – Подключение генерации сетки

экспериментально и составил 1мм. В соответствии с этим выбором, используя кнопочную панель, показанную на рисунке 4.17, выделяем **Body Sizing** и в меню **Definition** в поле **Element Size** вводим значение 0,001. Значение вводится в метрах, при этом обратите внимания на то, что разделителем должна быть именно запятая.

После ввода параметров сетки можно приступить к ее генерации. Для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на **Mesh** и выбрать пункт меню **Generate Mesh** (рисунок 4.18).

Если все параметры введены верно то сетка должна быть сгенерирована так, как показано на рисунке 4.19 . После этого нажимаем кнопку  **Update** и закрываем ANSYS Meshing.

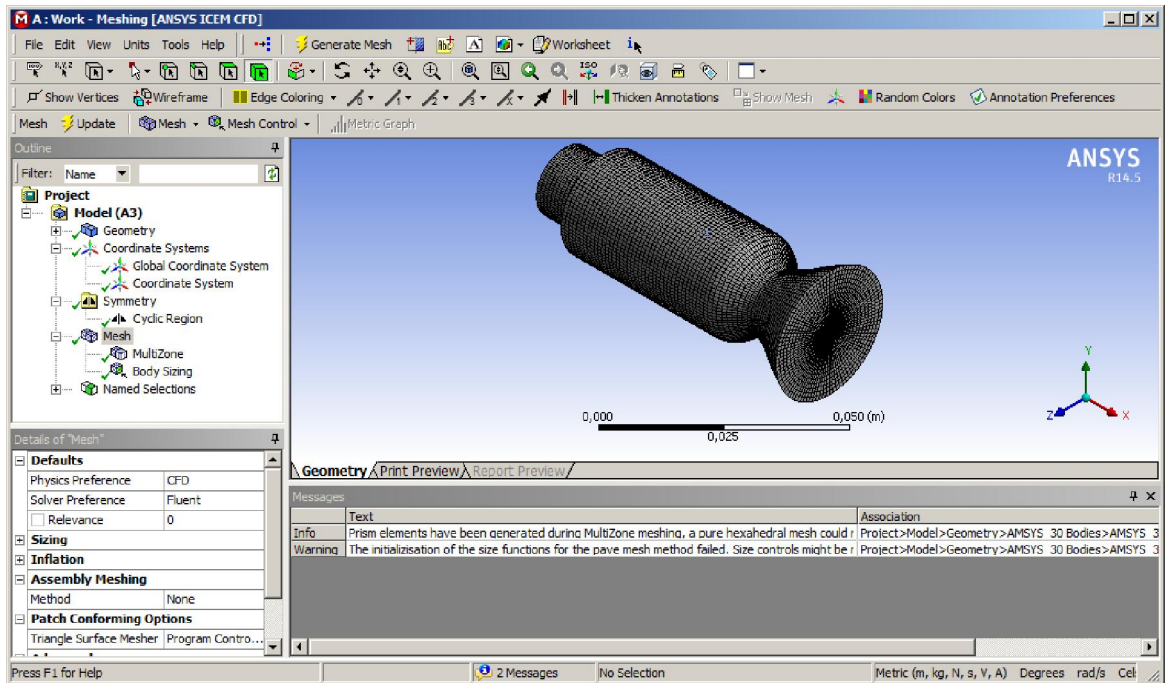


Рисунок 4.19 – Вид сгенерированной сетки рабочей области камеры ЖРД

4.4 Формирование CFD-модели течения газогенераторного газа в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД

Для численного моделирования течения газогенераторного газа в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД, геометрическая модель которого была создана в предыдущем разделе, используется ANSYS FLUENT. Для запуска

ANSYS Fluent необходимо дважды кликнуть по строке **Setup** в окне проекта интерфейса Workbench, в появившемся окне нажать кнопку **OK** (рисунок 4.20).

После

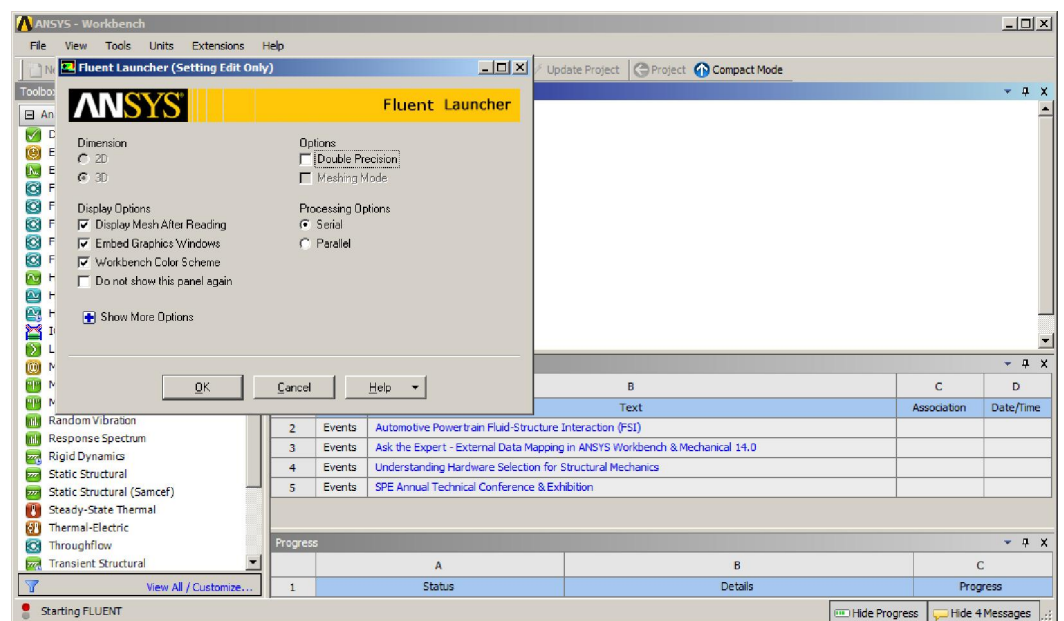


Рисунок 4.20 – Подключение Ansys Fluent в рабочем окне Ansys Workbench

загрузки и автоматического импорта данных будет доступен интерфейс и рабочее окно ANSYS Fluent, показанные на рисунке 4.21.

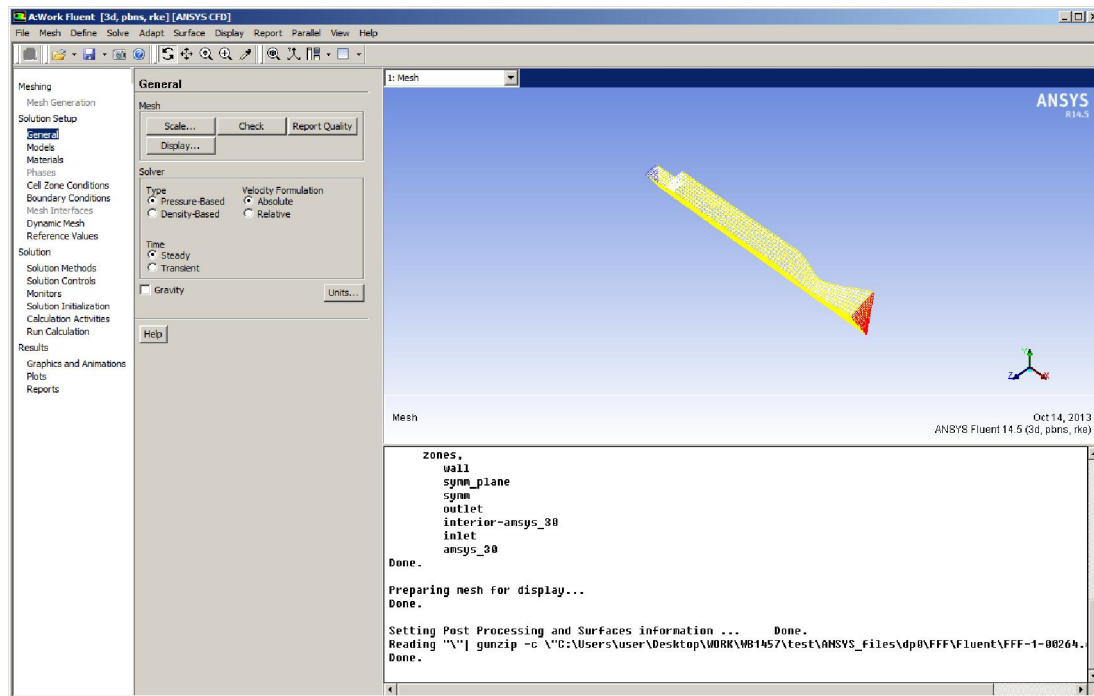


Рисунок 4.21 –Интерфейс и рабочее окно ANSYS Fluent Основ

ная работа по настройке будет происходить в главном меню ANSYS Fluent, вид которого показан на рисунке 4.22. Настройка ANSYS Fluent заключается, главным образом, в подключении физических моделей и формировании граничных условий, соответствующих условиям рассматриваемой задачи.

Настройку начинаем с раздела главного меню ANSYS Fluent **General** (рисунок 4.23), с помощью которого выбираем тип решателя основанного на давлении, поскольку он предпочтительнее для работы с высокими давлениями и сверхзвуковыми скоростями. Затем переходим к разделу главного меню ANSYS Fluent **Models** (рисунок 4.24), с помощью которого осуществляем подключение необходимых моделей.

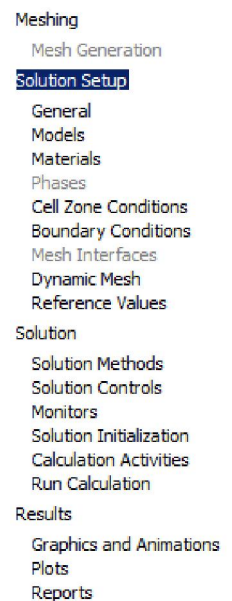


Рисунок 4.22

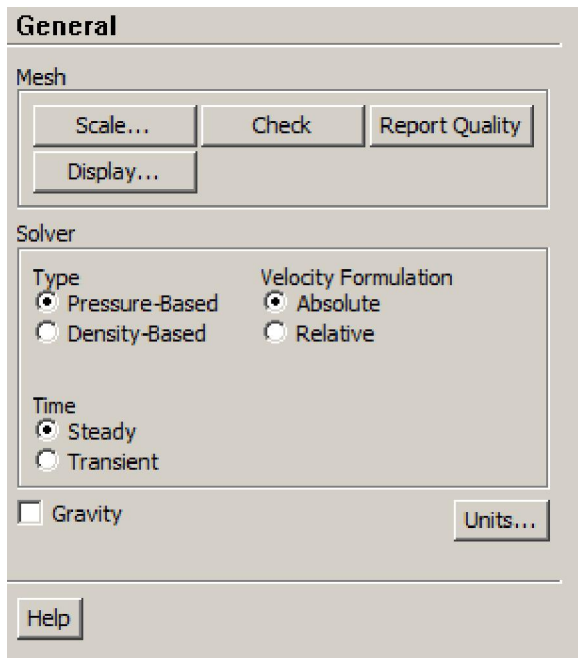


Рисунок 4.23- Панель раздела General

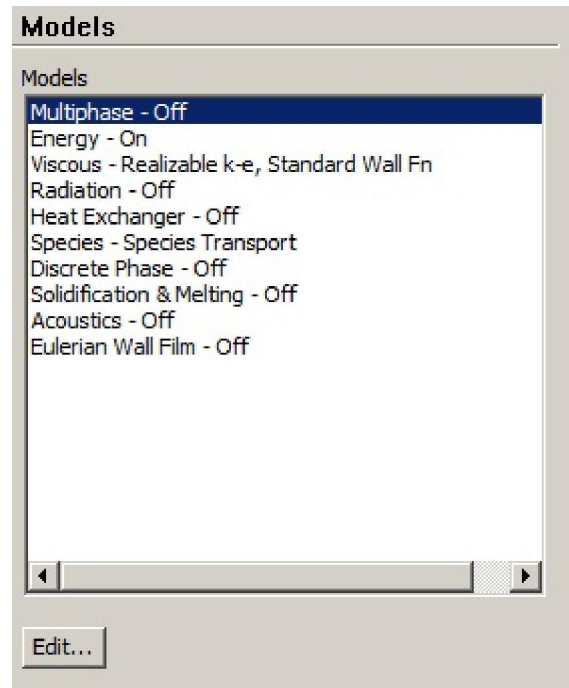


Рисунок 4.24 - Панель раздела Models

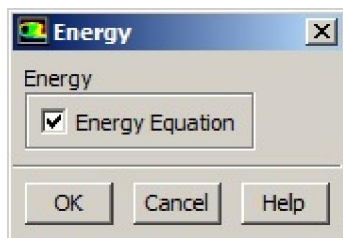


Рисунок 4.25

Выбираем пункт **Energy** в панели **Models** и нажимаем кнопку **Edit**, ставим галочку напротив **Energy Equation**, нажимаем **ОК** (рисунок 4.25) .

Далее выбираем в панели **Models** пункт **Viscous** и нажимаем кнопку **Edit**, в рамке

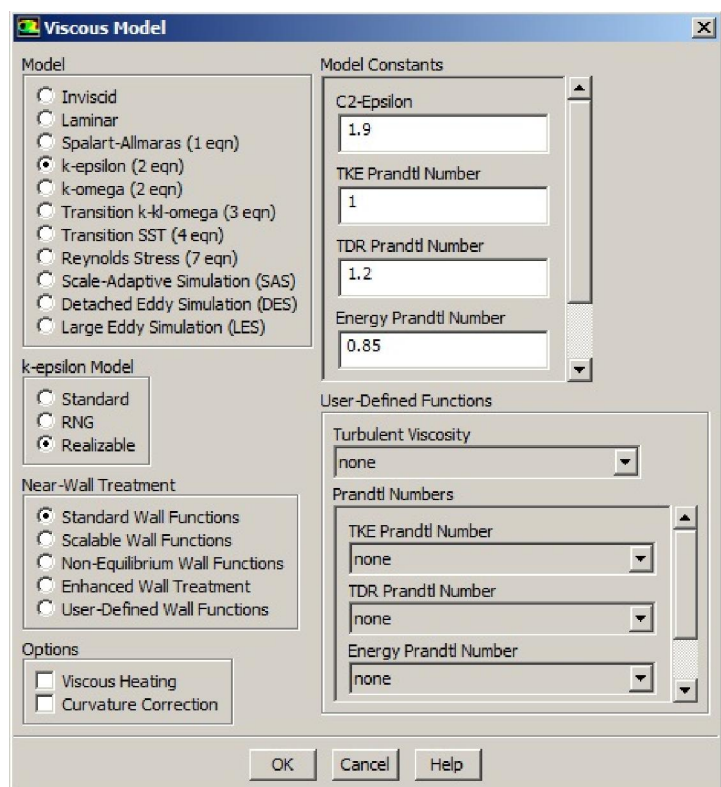


Рисунок 4.26 – Панель Viscous Models

Model выбираем **k-epsilon (2eqn)**, в рамке **k-epsilon Model** выбираем **Realizable** (рисунок 4.26) . Остальные параметры оставляем по умолчанию, нажимаем **ОК**.

Далее выбираем пункт **Species** и нажимаем кнопку **Edit**, в рамке **Model** устанавливаем переключатель на **Species Transport**, в рамке **Mixture Properties** в пункте **Mixture Material** выбираем **kerosene-air**, нажимаем **ОК** (рисунок 4.27)

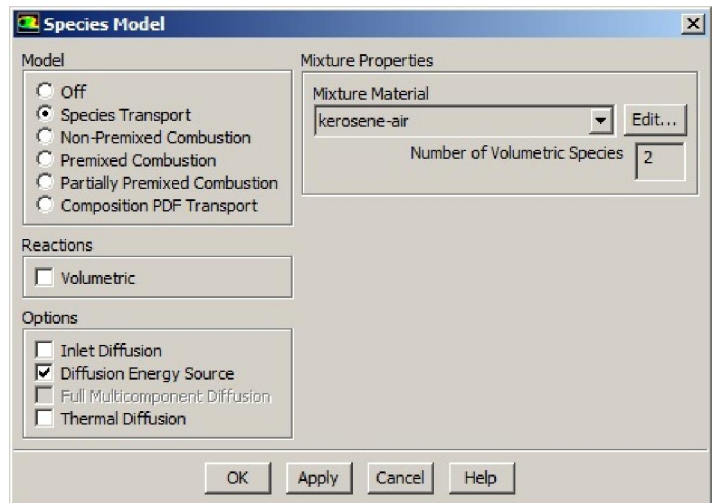


Рисунок 4.27 – Панель Species Model

Раздел **Materials**: выделите **kerosene-air** и нажмите кнопку **Create/Edit**. В появившемся окне найдите **Mixture Species** в поле **Properties** и нажмите **Edit**, в появившемся окне в поле **Selected Species** удалите ненужные компоненты, оставив только **o2** и **c12h23** для этого используйте кнопки **Add** и **Remove**, после чего нажмите **ОК** (рисунок 4.28)

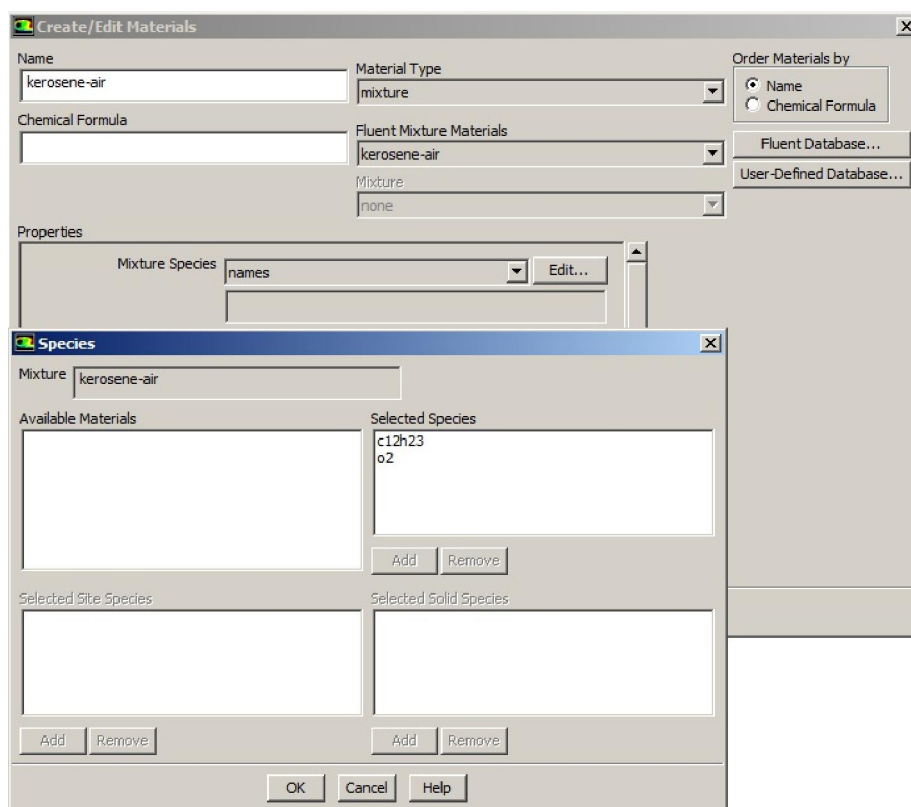


Рисунок 4.28 – Задание свойств керосина

Затем в поле Properties найдите Density и в выпадающем меню выберите пункт ideal-gas

(рисунок 4.29)

Перед тем как перейти к задаче формирования граничных условий, для удобства необходимо поменять единицы измерения давления. По умолчанию давление изменяется

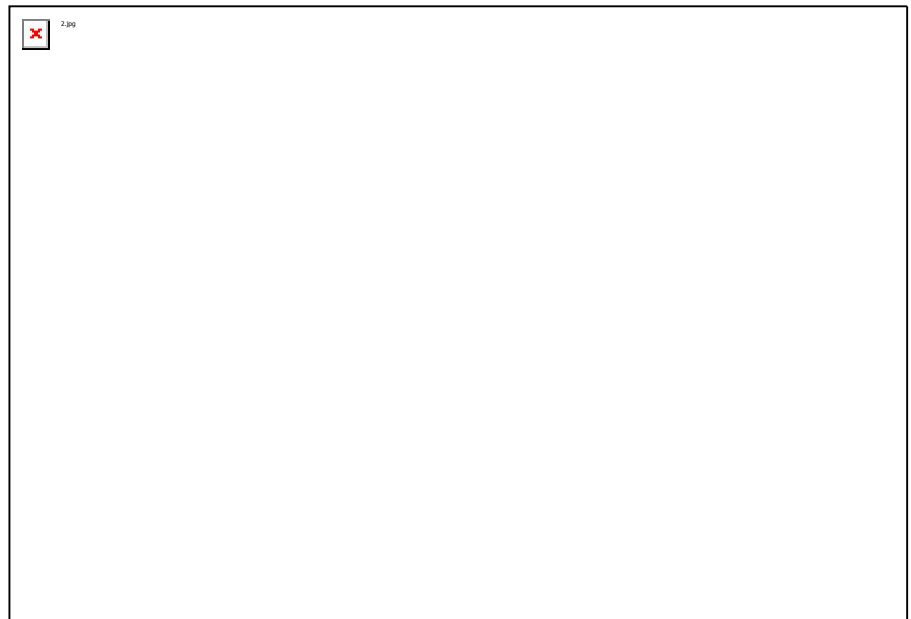


Рисунок 4.29- Задание модели идеального газа

в паскалях, а так как в расчетной модели давление задается миллионами паскалей, удобнее будет использовать МПа. Для этого в верхней горизонтальной строке главного выберите **Define > Units**, в окне **Quantities** найдите и выберете Pressure,

нажмите **New** в поле фактор введите значение 1000000, в поле **Unit** - mpascal, и нажмите **OK**. Затем нажмите **List** и далее **Close** (рисунок 4.30)

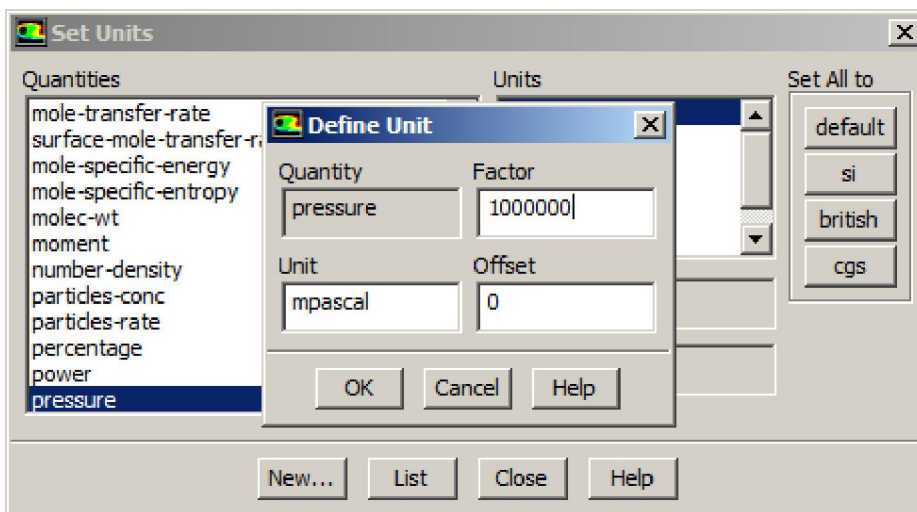
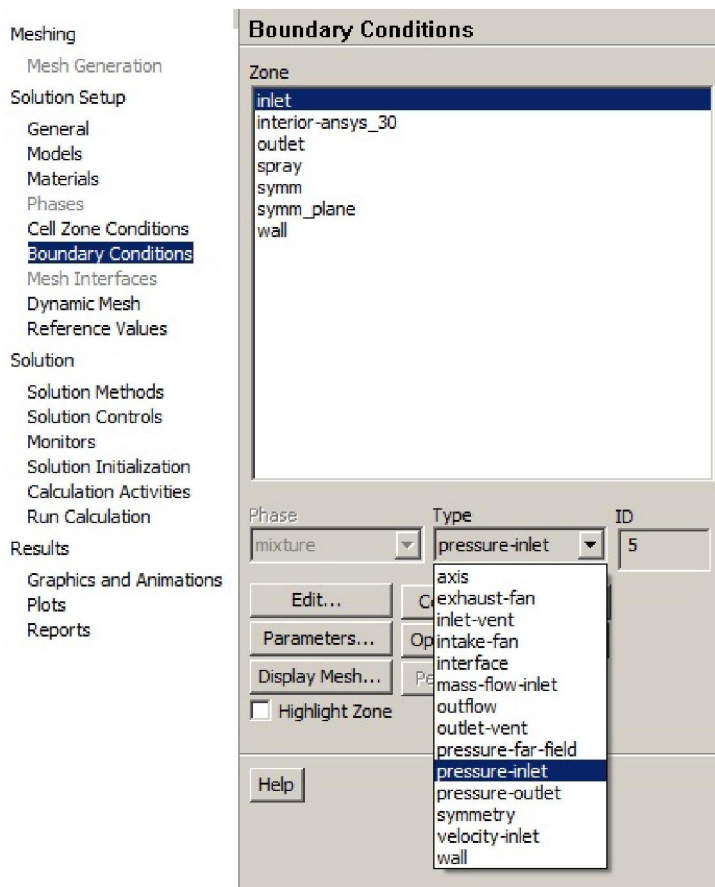


Рисунок 4.30- Панел Set Unins

Для формирования граничных условий модели используем кнопочную



панель **Boundary Conditions** (рисунок 4.31). В поле **Zone** этой панели выбираем **inlet** и в выпадающем списке **type** выбираем **Pressure-inlet** (рисунки 4.31, 4.32). В появившемся окне в **Pressure-inlet** выставляем необходимые значения величин давления во вкладке **Momentum** (рисунок 4.32). Во вкладке **Thermal** окна в **Pressure-inlet** задаем температуру генераторного газа (рисунок 4.33). Остальные параметры оставляем без изменений и нажимаем ОК.

Рисунок 4.31 – Панель Boundary Conditions

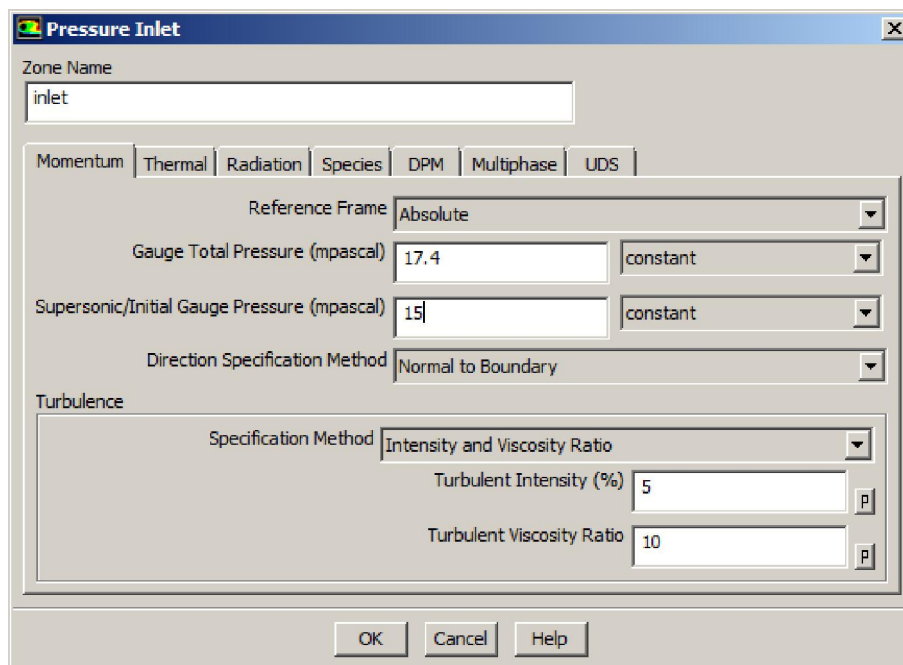


Рисунок 4.32 - Панель Pressure-inlet

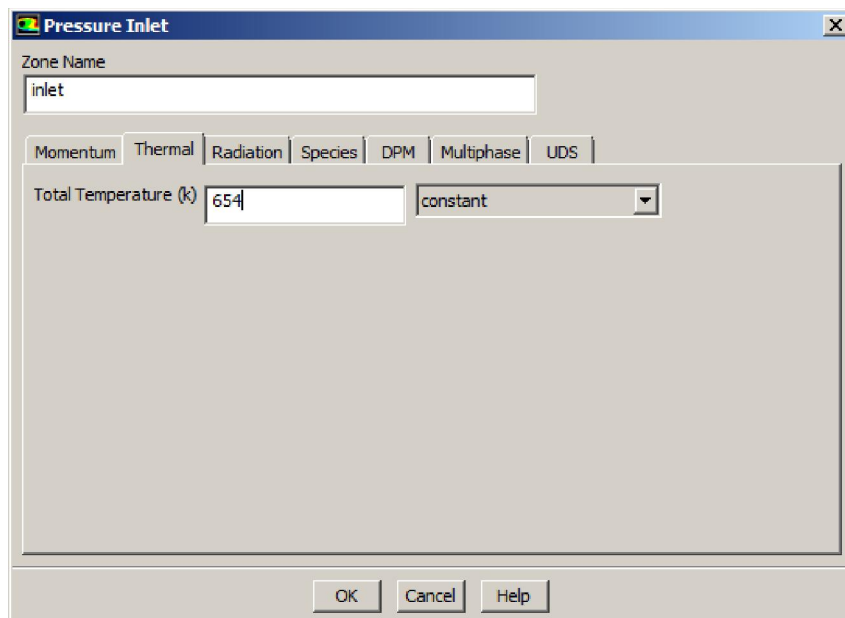


Рисунок 4.33 - Задание температуры генераторного газа

Следующий этап численного моделирования связан с формированием процедуры проведения расчета.

4.5 Формирование процедуры численного решения CFD- модели течения газогенераторного газа в форсуночной головке камеры сгорания ЖРД

Необходимые для проведения расчета опции устанавливаются с помощью кнопочных панелей **Solution Methods**

(рисунок 4.34) и **Solution Controls** (здесь, в частности, увеличиваем лимит по температуре в десять раз, нажав кнопку **Limits** (рисунок 4.35) .

С использованием панели **Solution Initialization** выполняем следующие действия (рисунок 4.36) :

в рамке **Initialization Methods** выбираем

Standard Initialization, в выпадающем списке

Compute from выбираем **inlet** и нажимаем

Initialize . Панель **Run Calculation**

используем в следующих целях (рисунок 4.37) :

в разделе **Time Step Method** выбираем **User**

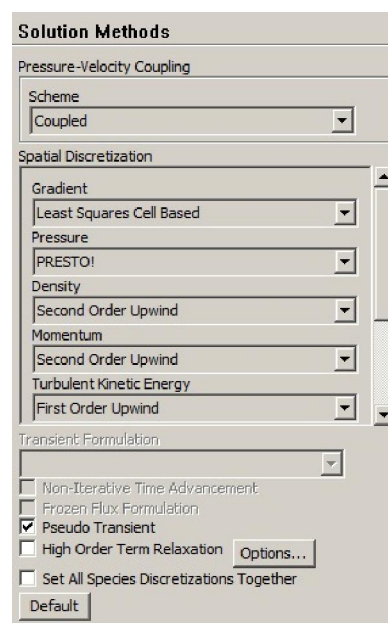


Рисунок 4.34- Панель SolutionMethods

Specified, в окне **Number of Iterations** вводим значение 5000, и нажимаем **Calculate** (выполнение расчета). После того, расчет будет проведен, можно приступить к наглядному отображению его результатов..

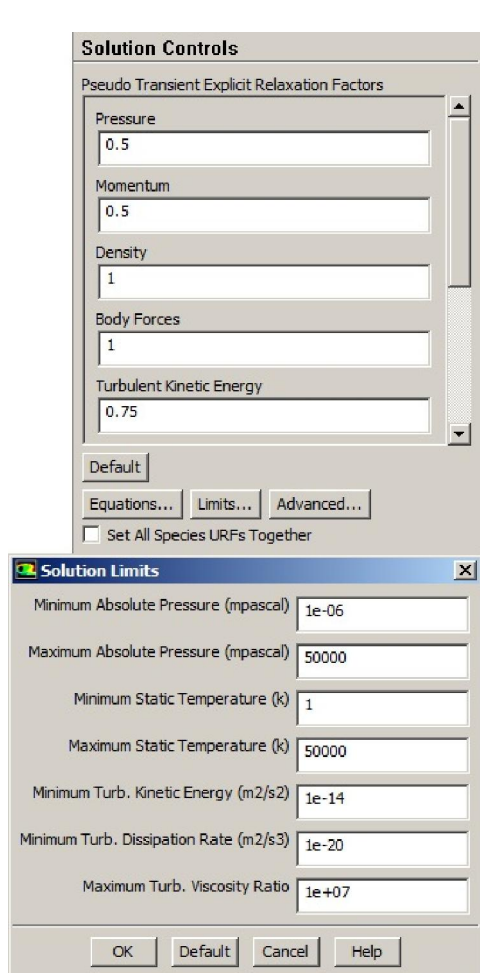


Рисунок 4.35 – Панель Solution Controls

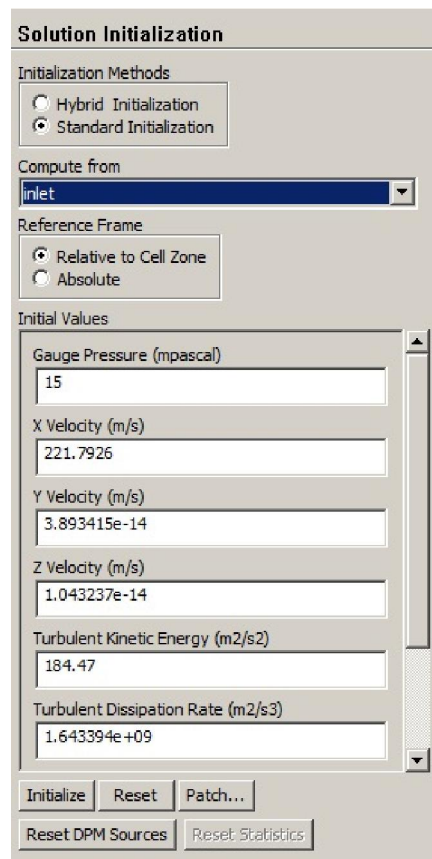


Рисунок 4.36 – Панель Solution Initialization

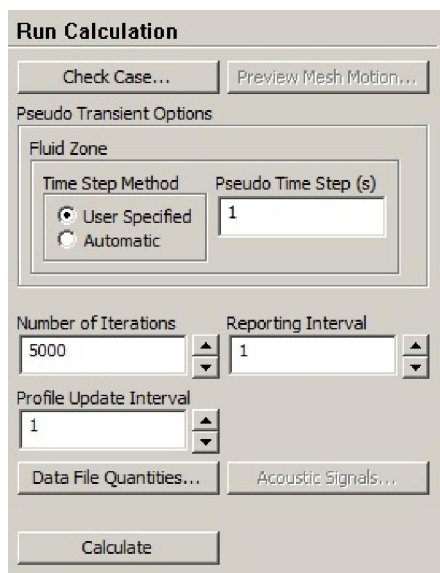


Рисунок 4.37 – Панель Run Calculation

4.6 Отображение результатов расчета и проверка его адекватности

Раздел Graphics and Animations: в окне Graphics выбираем Contours и нажимаем кнопку Set Up. В выпадающем списке Contours of выбираем необходимую переменную, в поле Surface выделяем `symm` или `symm_plane`, в зависимости от того, какая из этих плоскостей расположена нормально. В рамке Options выбираем нужные опции отображения, в поле Levels указываем значение 100, для более гладкой картинки и нажимаем Display (рисунок 4.38).

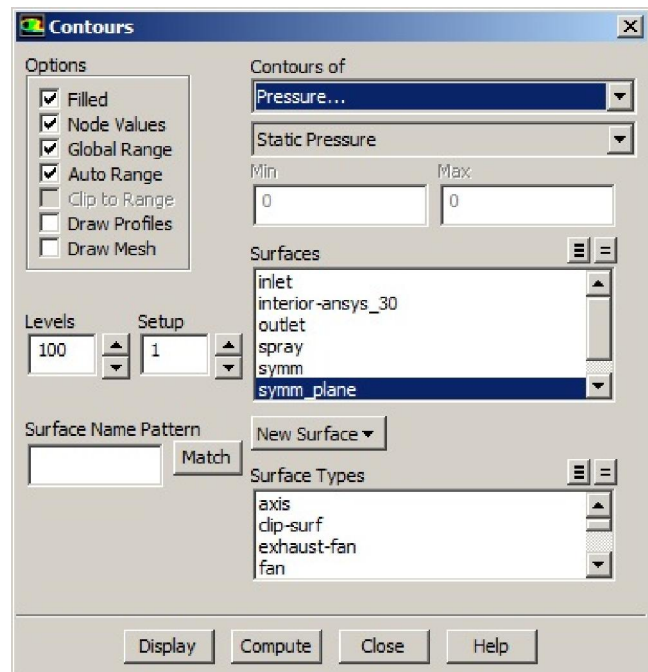


Рисунок 4.38- Панель Contours

Далее в окне Graphics выбираем Vectors и нажимаем кнопку Set Up. В выпадающем списке Vectors of выбираем необходимую переменную, в поле Surface выделяем `symm` или `symm_plane`, в зависимости от того, какая из этих плоскостей расположена нормально. В рамке Options выбираем нужные опции отображения, в поле Scale указываем значение 10, для лучшей видимости и нажимаем Display (рисунок 4.39).

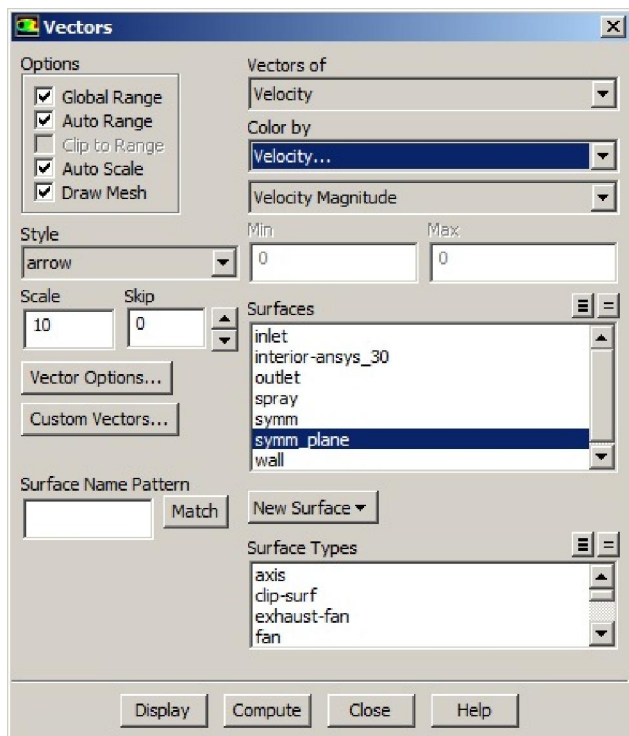


Рисунок 4.39- Панель Vectors

В качестве основного параметра, по которому проверялась адекватность полученного решения, являлось поле чисел Маха при течении газогенераторного газа в камере сгорания и сверхзвуковом осесимметричном сопле Лавалья ЖРД, поскольку это поле хорошо изучено [1].

Результаты расчета поле чисел Маха для течения газогенераторного газа в камере ЖРД, приведенные на рисунке 4.40, показывают его соответствие известным результатам, что подтверждает адекватности созданной численной модели.

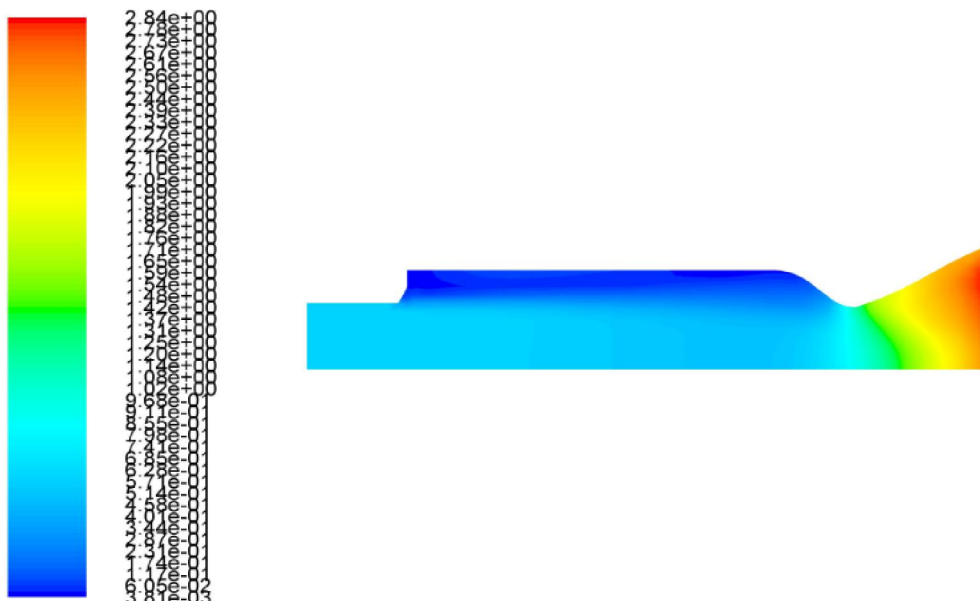


Рисунок 4.40 – Поле чисел Маха для течения газогенераторного газа в камере ЖРД

5 Формирование CFD- модели процесса испарения в среде генераторного газа на выходе из форсуночной головки камеры сгорания ЖРД в инструментальной среде Ansys Workbench

За основу этой модели взята модель полученная , полученная в предыдущем пункте 4. Поэтому запускаем Ansys Workbench и открываем проект, выполненный в предыдущем пункте. Далее открываем fluent, дважды щелкнув по кнопке setup в окне проекта. Откроется уже знакомый интерфейс ANSYS FLUENT. Большинство необходимых настроек было выполнено в предыдущем разделе, поэтому перейдем к подключению и настройке лишь новых элементов создаваемой

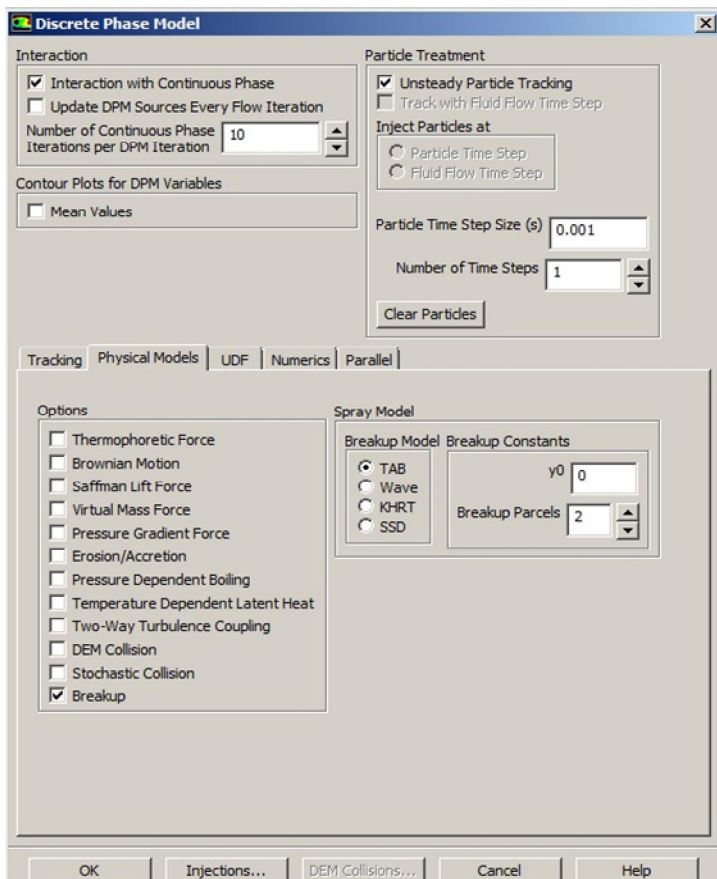


Рисунок 5.2- Панель Discrete Phase Model

рисунок 5.3)

МОДЕ
ЛИ .

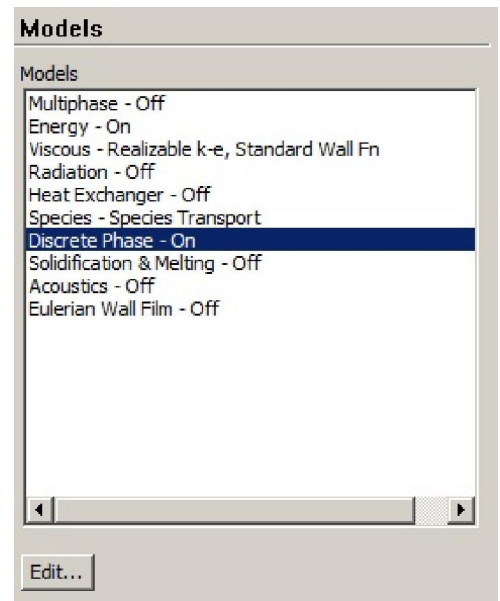


Рисунок 5.1- Панель Models

В панели **Models** выбираем пункт **Discrete Phase**, нажимаем кнопку Edit (рисунок 5.1) В появившемся окне в рамке Interaction ставим галочку на против Interaction with Continuous Phase, переходим во вкладку Physical Models в рамке Options ставим галочку на против Breakup (рисунок 5.2) . Затем переходим во вкладку Numerics в рамке Averaging ставим галочку на против Enable Node Based Averaging (

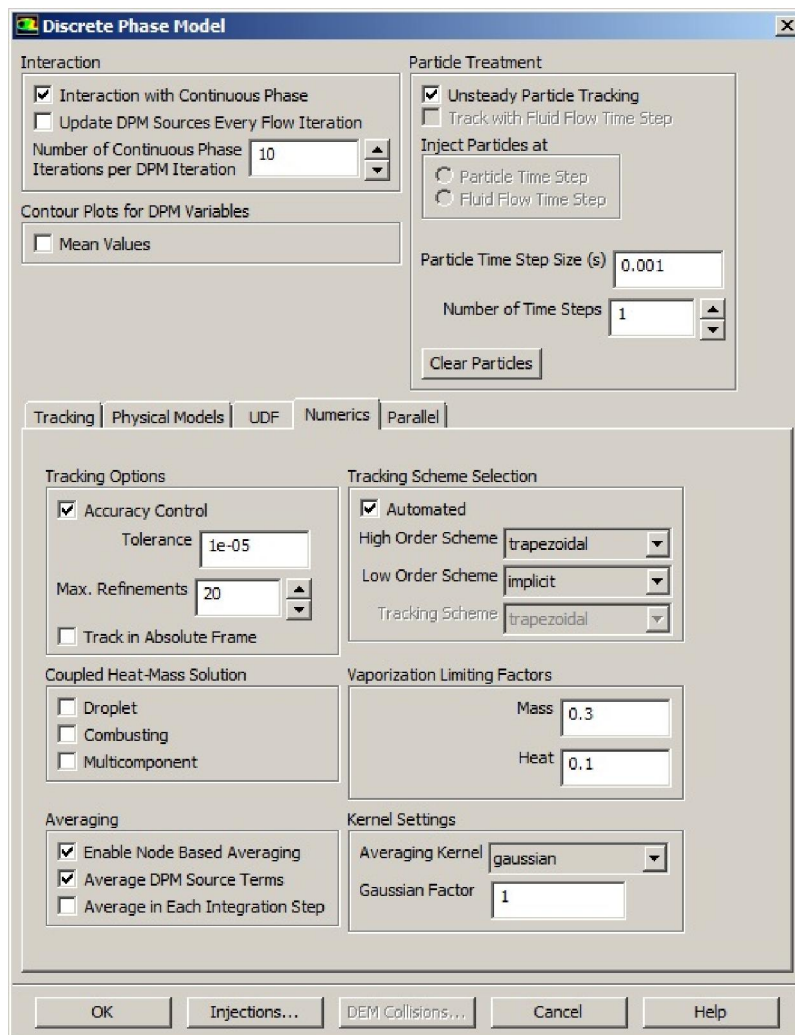


Рисунок 5.3 – Панель Discrete Phase Model

Нажимаем кнопку **Injections** на этой панели. В появившемся окне (рисунок 5.4) нажимаем кнопку **Create**, переходим к панели **Set Injection Propertis** (рисунок 5.5) и с помощью кнопок этой панели устанавливаем следующие опции: в выпадающем меню **Injection Type** выбираем пункт **Surface**, в окне **Release From Surfaces** выбираем заранее подготовленную поверхность **spray**, в рамке



Рисунок 5.4- Панель Injections

Particle Type ставим переключатель на **Droplet**. В выпадающем списке **Material** выбираем **kerosene-liquid**, в выпадающем списке **Evaporating Species** выбираем **c12h23** (химическую формулу керосина). Далее устанавливаем параметры форсунки (инжектора) , нажимаем ОК, затем еще раз ОК .

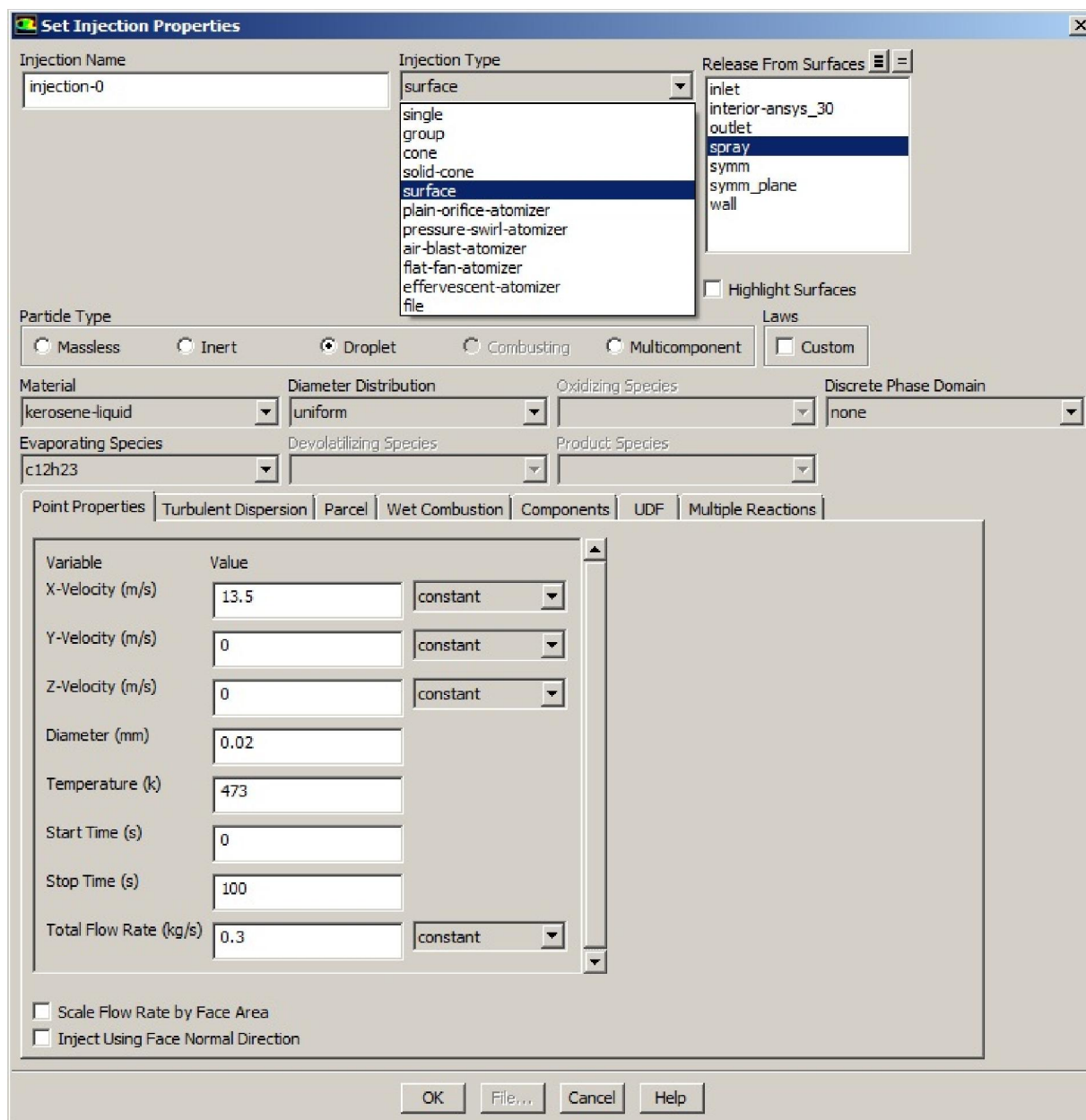


Рисунок 5.5- Панель Set Injection Propertis

Поскольку все необходимые настройки граничных условий были заданы в процессе формирования предыдущей модели (см. раздел 4) , сразу перейдем к настройкам решателя. Для этого открываем панель **Solution Methods** (рисунок 5.6) и устанавливаем указанные там опции .

Затем, открыв панель **Solution Controls** (рисунок 5.7) , устанавливаем

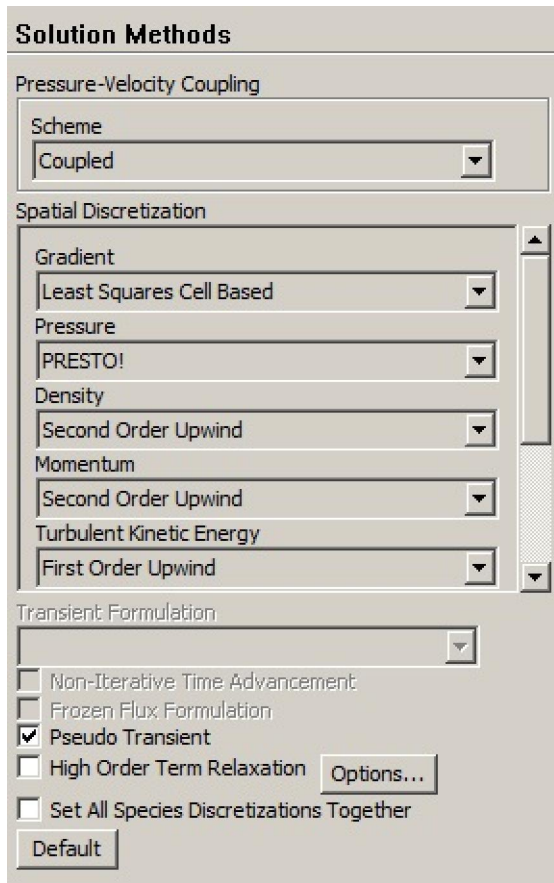


Рисунок 5.6 – Панель Solution Methods

указанные там опции, увеличиваем лимит по температуре, давлению и турбулентности (это можно сделать нажав кнопку Limits).

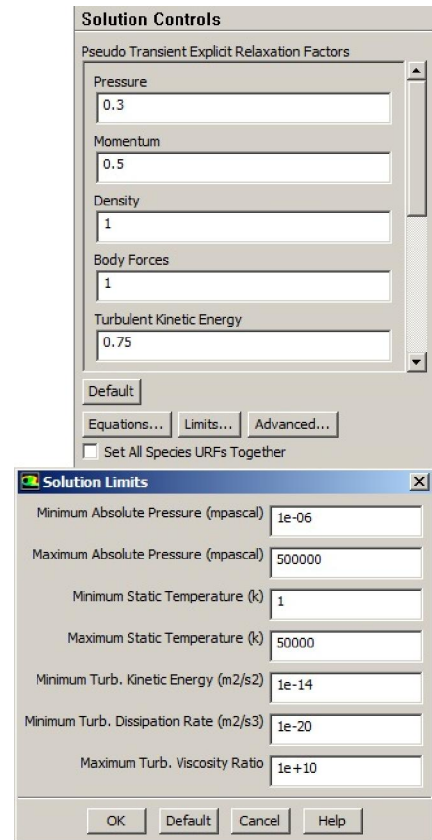


Рисунок 5.7- Панель Solution Controls

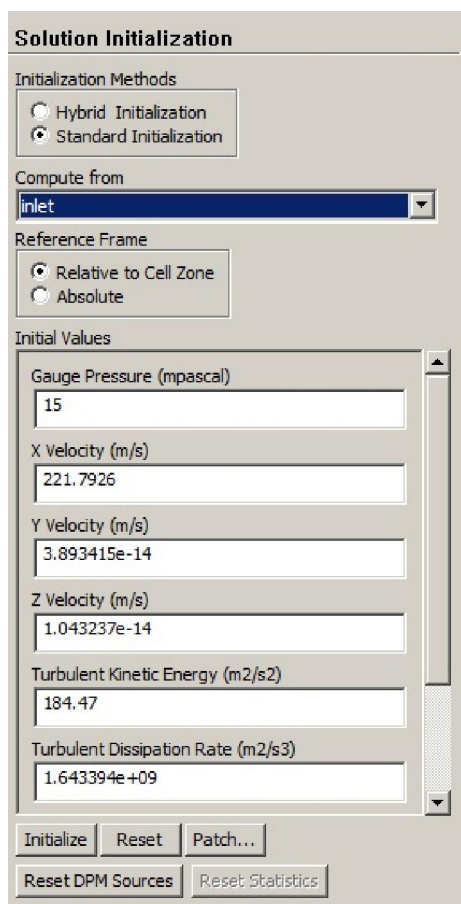


Рисунок 5.8 – Панель Solution Initialization

Открыв панель **Solution Initialization** (рисунок 5. 8) , в разделе **Initialization Methods** выбираем **Standard Initialization**, а в выпадающем списке **Compute from** выбираем **inlet** и нажимаем **Initialize**. На этом формирование модели закончено и можно переходить к этапу формирования процедуры проведения численного расчета.

Для этого открываем панель **Run Calculation** (рисунок 5.9 и в разделе **Time Step Method** выбираем **User Specified**, затем в окне **Number of Iterations** вводим число 5000, после чего нажимаем кнопку **Calculate**, запуская процедуру расчета .

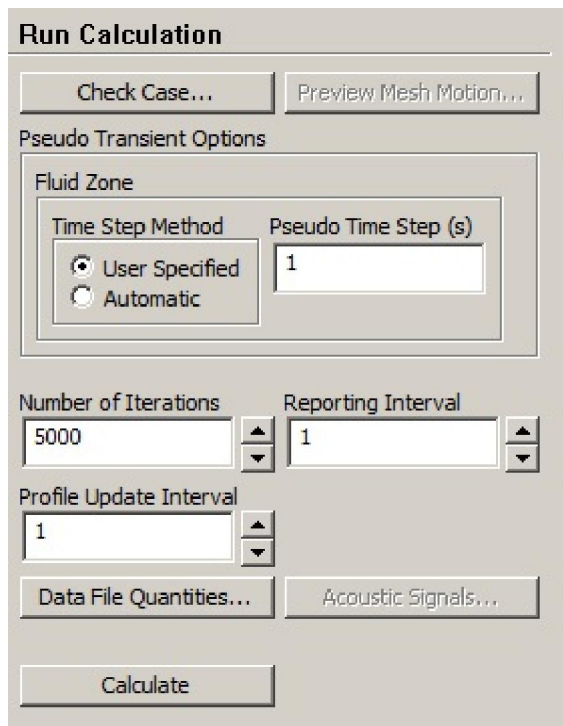


Рисунок 5.9 – Панель Run Calculation

отображения, в поле **Levels** указываем значение 100 для более гладкого визуального представления и нажимаем **Display** . На рисунках 5.10...5.14 показаны результаты использования панели **Contours** для графического представления таких параметров , как давление, температура, скорость газовой фазы, а также концентрация паровой фазы и

После того, расчет будет окончен, можно приступить к формированию наглядного отображения результатов расчета. Для этого используем панель **Graphics and Animations** (рисунок 4.22). В окне **Graphics** выбираем **Contours** и нажимаем кнопку **Set Up** (рисунок 5.10). В выпадающем списке **Contours of** выбираем необходимую переменную, в поле **Surface** выделяем **symm** или **symm_plane**, в зависимости от того, какая из этих плоскостей расположена нормально. В разделе **Options** выбираем нужные опции

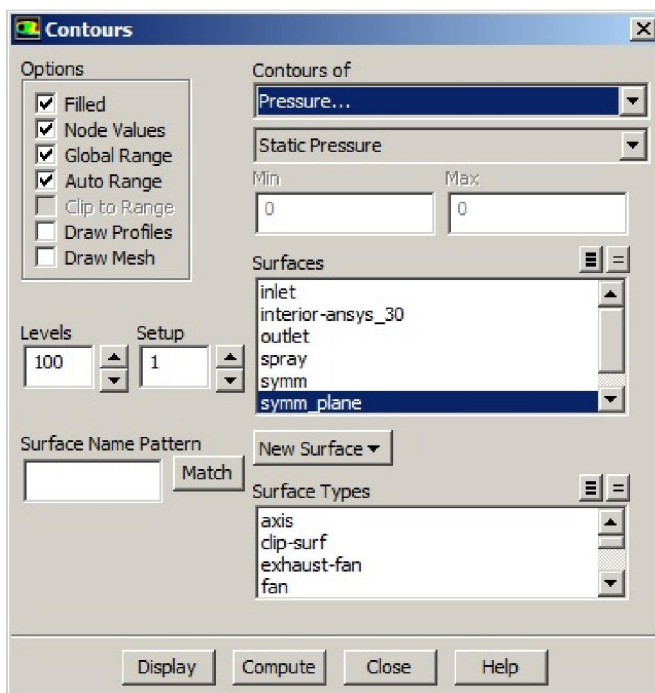


Рисунок 5.10- Использование панели Contours для графического представления поля давления

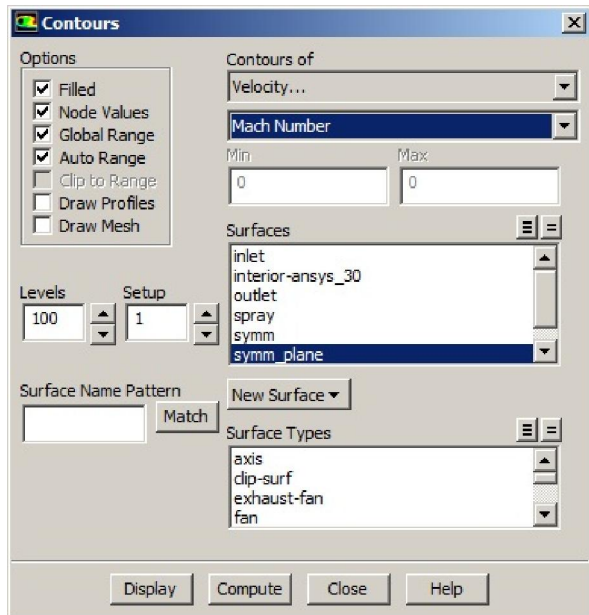


Рисунок 5.11 - Использование панели Contours для графического представления поля скорости

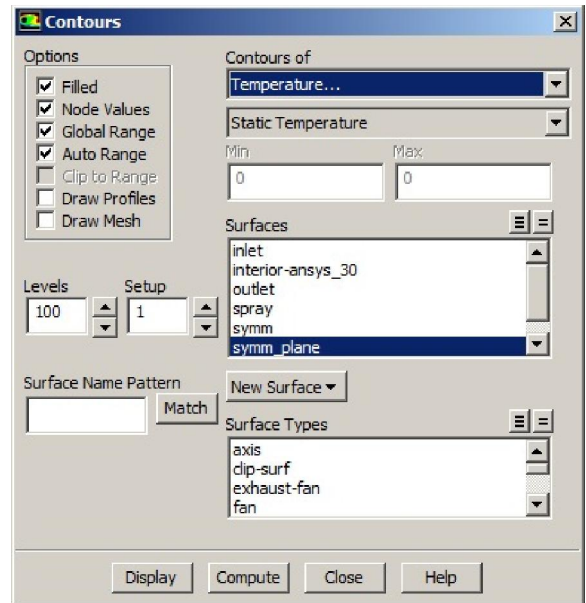


Рисунок 5.12 - Использование панели Contours для графического представления поля температур
массовая доля неиспарившихся капель

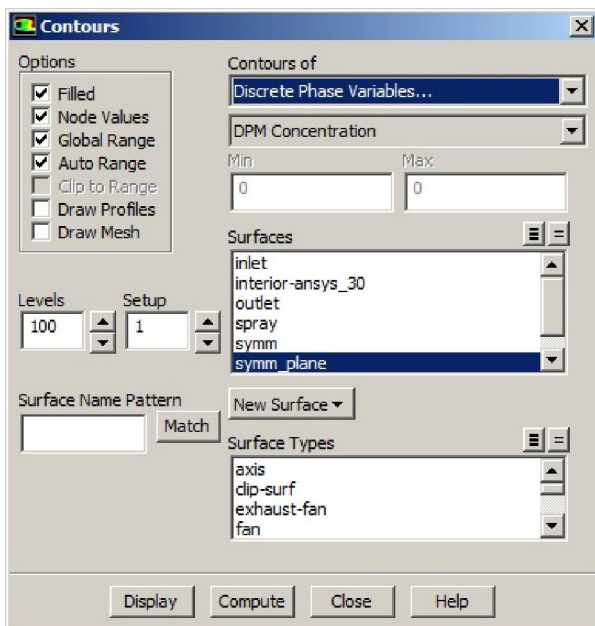


Рисунок 5.14 - Использование панели Contours для графического представления массовой доли неиспарившихся капель керосина

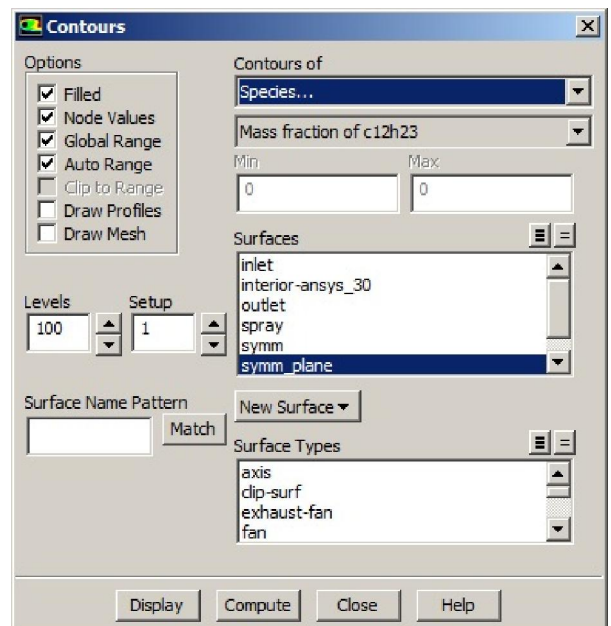


Рисунок 5.13 - Использование панели Contours для графического представления концентрации паров керосина

Далее в окне Graphics выбираем Vectors и нажимаем кнопку Set Up. В выпадающем списке Vectors of (рисунок 5.15) выбираем необходимую переменную, в поле Surface выделяем `symm` или `symm_plane`, в зависимости от того, какая из этих плоскостей расположена нормально. В разделе **Options** выбираем нужные опции отображения, в поле **Scale** указываем значение 10 для лучшей видимости и нажимаем кнопку **Display**.

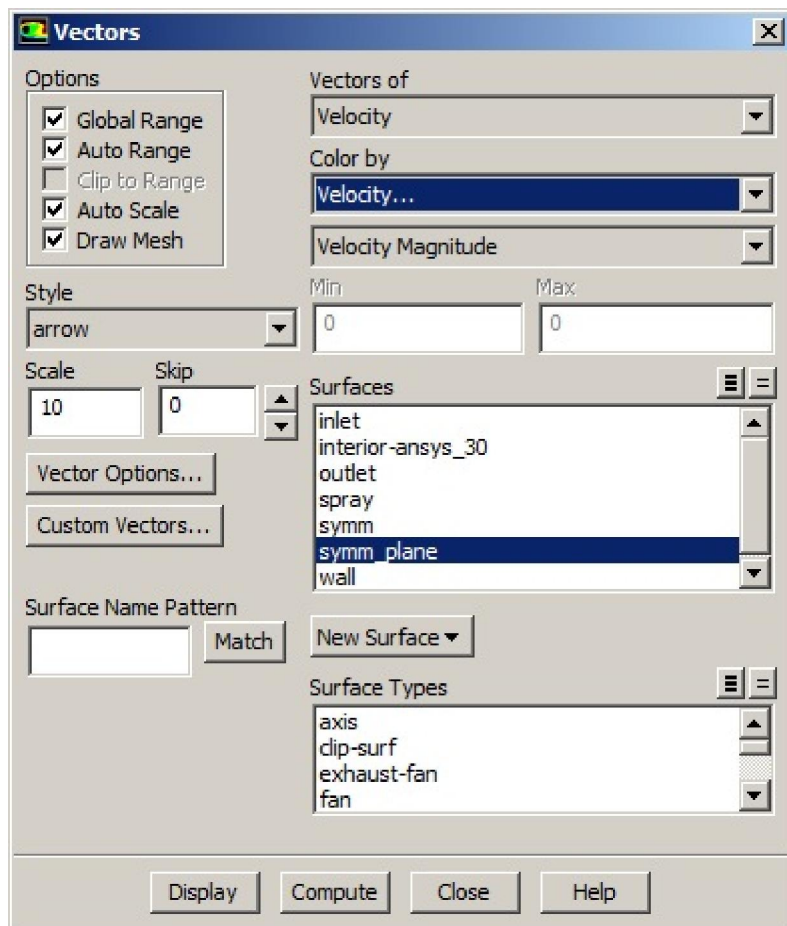


Рисунок 5.15- Использование панели Vectors для графического представления векторного поля скоростей

В качестве основного параметра, по которому проверялась адекватность полученного решения, наряду с полем чисел Маха, использовалось поле концентраций паров керосина в потоке газогенераторного газа в камере ЖРД. Результаты расчета полей чисел Маха и концентраций паров керосина в потоке

газогенераторного газа в камере ЖРД , приведенные на рисунке 5.16...5.18, показывают их соответствие известным результатам [] , что подтверждает адекватности созданной численной модели .

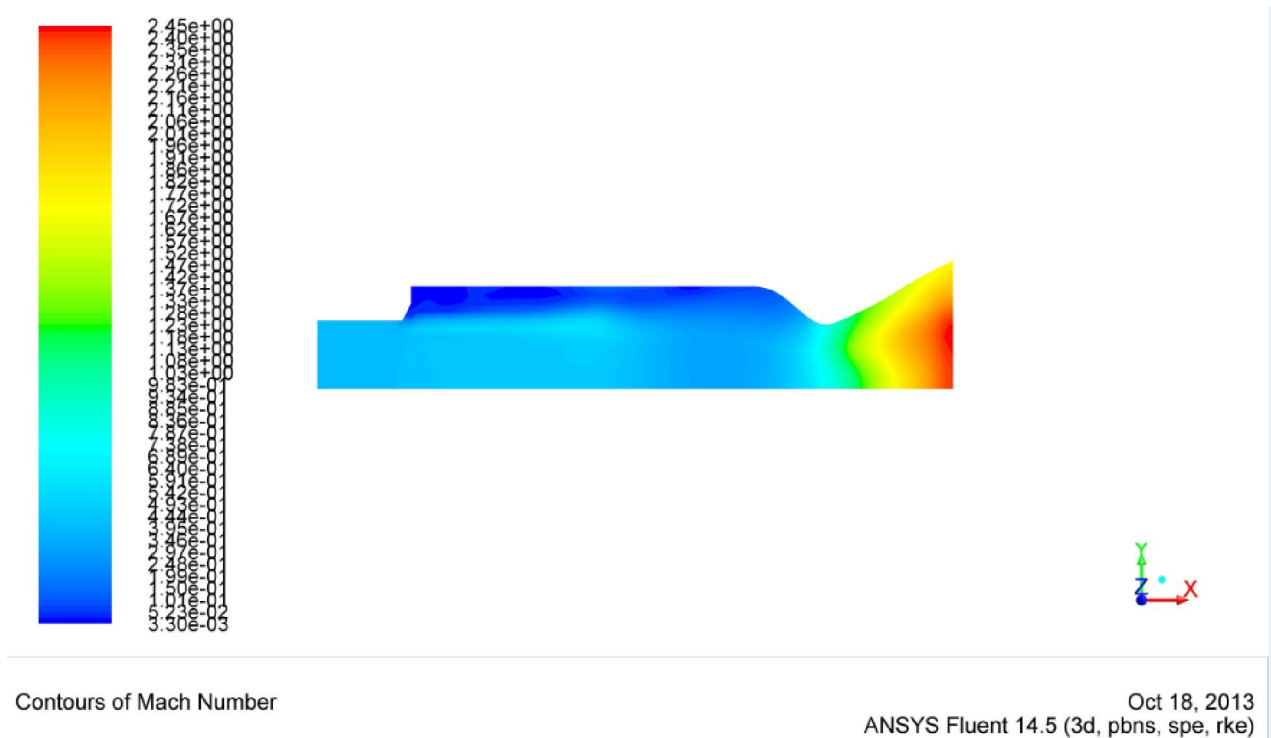


Рисунок 5.16- Поле чисел Маха при течении в камере ЖРД газогенераторного газа с парами керосина

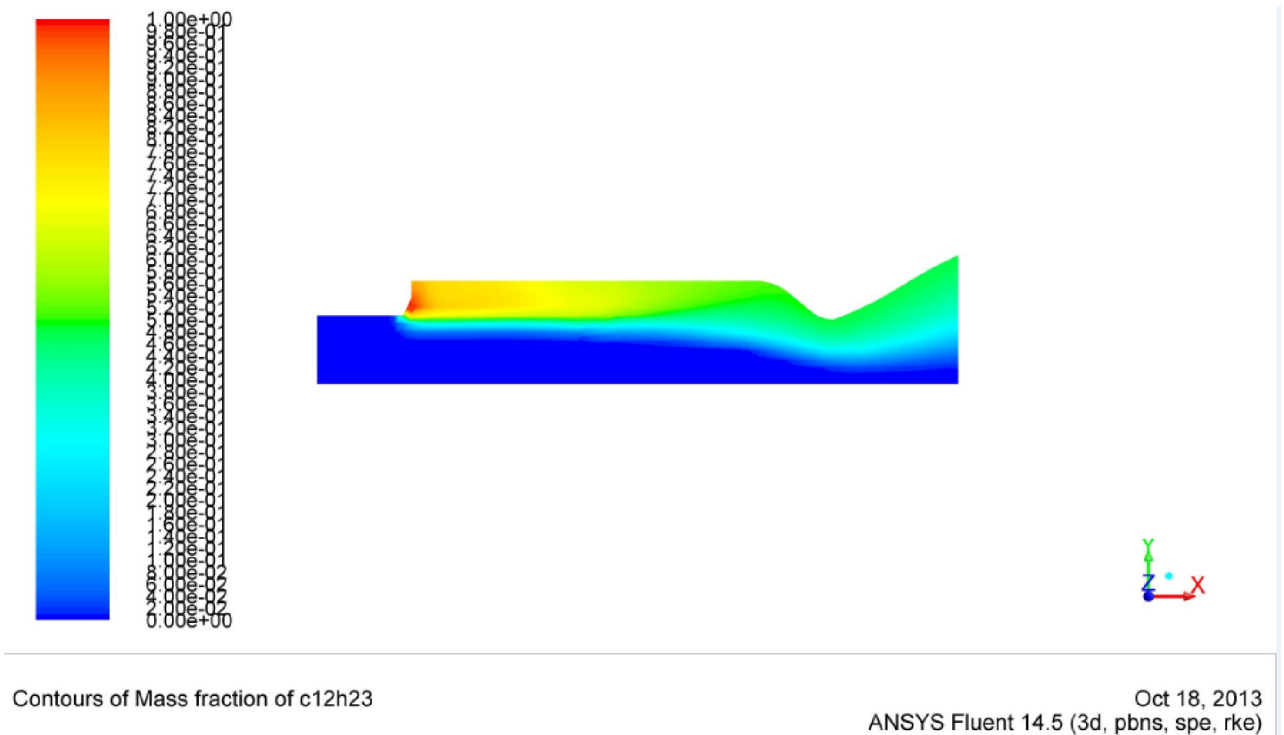
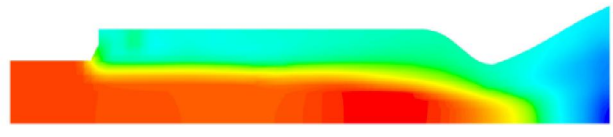
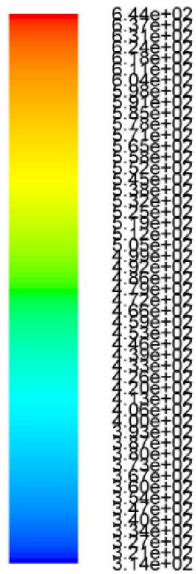


Рисунок 5.17- Поле концентраций паров керосина в среде газогенераторного газа при течении в камере ЖРД



Contours of Static Temperature (k)

Oct 18, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, spe, rke)

Рисунок 5.18- Поле температур при течении в камере ЖРД газогенераторного газа с парами керосина

Библиографический список

1. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей [Текст]: учебник для ВУЗов / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегаллин, А. Л. Тишин. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
2. Гахун, Г. Г. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учебник для ВУЗов / Г. Г. Гахун и [др.] – М.: Машиностроение, 1989. – 424 с.
3. Добровольский, М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования [Текст]: учебник для ВУЗов / М. В. Добровольский – М.: Машиностроение, 2005. – 488 с.
4. Егорычев, В. С. Расчет и проектирование смесеобразования в жидкостном ракетном двигателе [Текст]: учебное пособие для ВУЗов / В. С. Егорычев. - Самара, СГАУ, 2011. - 100 с
5. Лебединский, Е. В. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование [Текст] / Е. В. Лебединский [и др.] , под. ред. акад. РАН А. С. Коротеева // М.: Машиностроение, 2008.-512с.
6. Неустойчивость горения в ЖРД [Текст] / Под. ред. Д. Т. Харрье и Ф. Г. Рирдона. Пер.с англ. – М.: Мир, 1975. – 869 с.
7. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст]: Учебник для ВУЗов. Под ред. Кудрявцева В. М., Изд-е 3-е, исправл. и дополн. – М.: Выс. школа, 1983. – 703 с.
8. ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. 2011 г, 685 с
9. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide 2011 г, 1145 с