МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Автоматизированное проектирование ЖРД на топливе керосин-кислород с использованием CAE/CAD/PDM-технологий

Электронное учебное пособие

САМАРА
2012

УДК 621.431 (075)
ББК 39.55

Авторы: **Шустов Станислав Алексеевич,**
Проданов Михаил Евгеньевич,
Безменова Наталья Витальевна,
Силютин Максим Владимирович

Рецензент:
Доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов В. А. Зрелов

Редакторская обработка
Компьютерная верстка М. Е. Проданов

Автоматизированное проектирование ЖРД на топливе керосин-кислород с использованием CAE/CAD/PDM-технологий [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / С.А. Шустов, М.Е. Проданов, Н. В. Безменова, М. В. Силютин; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (10 Мбайт). - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

Излагаются основные понятия, термины и определения, связанные с автоматизированным проектированием ЖРД с использованием CAE/CAD/PDM- технологий. Рассмотрены основные проблемы автоматизированного проектирования ЖРД как сложного технического объекта, показана роль возможности и методы системного подхода применительно к решению этих проблем.

Дана формализованная постановка задач структурного и параметрического синтеза как основных проектных процедур при автоматизированном проектировании , показана ограниченность использования точных методов при решении этих задач и рассмотрены приближенные методы их решения , основанные на использовании CAE/CAD технологий.

Рассмотрен пример использования CAE/CAD- технологий применительно к проектированию камеры ЖРД НК-33 на топливе керосин-кислород с использованием программного комплекса ANSYS CFX, показаны возможности и ограничения этого программного комплекса применительно к его использованию в автоматизированном проектировании ЖРД.

Изложена технология формирования единого информационного пространства при автоматизированном проектировании ЖРД на основе использования PDM-технологии и объектно-ориентированного подхода.

Пособие предназначено для проведения практических занятий и курсового проектирования по дисциплине «Системы автоматизированного проектирования ракетных двигателей » (ГОС 2-го поколения специальности 160302.65 «Ракетные двигатели» и специализации «Экологический менеджмент в ракетном двигателестроении» , набор 2009 г, семестр 8) , а также для проведения практических занятий и курсового проектирования по дисциплине «Автоматизация проектирования авиационных и ракетных двигателей » (ФГОС 3-го поколения специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» , семестр А).

Подготовлено на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Содержание

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ 5
1.1 Основные термины понятия, термины и определения, связанные с автоматизированным проектированием ЖРД 5
1.2 Основные понятия о системном подходе к проектированию сложных технических объектов 10
1.3 Основные понятия о структурно-функциональной декомпозиции объекта проектирования 14
1.4 Основные понятия о декомпозиции процесса проектирования сложных технических объектов по времени 17
1.4.1 Стадии научно-исследовательских работ: предпроектная стадия и стадия разработки технических предложений 18
1.4.2 Стадии опытно - конструкторских работ: эскизное и техническое проектирование 25
1.4.3 Стадия рабочего проектирования 26
1.4.4 Этапы проектирования, проектные процедуры и проектные операции 27
1.5 Основные понятия о проектных процедурах 28
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖРД И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAD-ТЕХНОЛОГИЙ 33
2.1 Постановка задачи структурного синтеза 33
2.2 О точном решении задач структурного синтеза 45
2.3 Приближенные формализованные методы решения задач структурного синтеза 49
2.4 Основные понятия о системном подходе к решению задач структурного синтеза при автоматизированном проектировании ЖРД 52

3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖРД И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAE/CAD-ТЕХНОЛОГИИ 64
3.1 Постановка задачи параметрического синтеза 64
3.2 Математическое и информационное обеспечение задач параметрического синтеза 67
3.3 Технология и результаты CAE- моделирования внутрикамерных рабочих процессов ЖРД с использованием программного комплекса Ansys CFX 72
3.3.1 Создание расчетной CFD-модели сегмента камеры ЖРД и геометрической CAD-модели сегмента камеры ЖРД 72
3.3.2 Результаты расчета с использованием CAE - модели сегмента камеры ЖРД в среде Ansys CFX 78
4 РАЗРАБОТКА PDM - ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖРД НА ТОПЛИВЕ КЕРОСИН-КИСЛОРОД 88
4.1 Обоснование целесообразности объектно-ориентированного подхода к формированию проектного облика ЖРД 88
4.2 Структура классов и ее использование для хранения данных о проектном облике ЖРД в PDM-системе Smarteam 90
4.2.1 Описание структуры классов 90
4.2.2 Реализация структуры классов для хранения данных о проектном облике ЖРД 93
4.3 Использование данных в PDM-системе Smarteam для оптимальной организации проектных процедур 97
Перечень использованных источников 116

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

1.1 Основные термины понятия, термины и определения, связанные с автоматизированным проектированием ЖРД

Современные ЖРД представляют собой пример одних из самых сложных технических объектов. На рисунке 1.1 в системе координат (J_{Σ}, $P_{п}$) показаны области рационального использования ЖРД. Этим областям соответствуют такие сочетания величины тяги ЖРД, типа рабочего тела и системы его подачи, при которых двигательные установки (ДУ) с этими ЖРД будут иметь наилучшие габаритно-массовые характеристики.

Область А на рисунке 1.1 соответствует маршевым ракетным двигате-

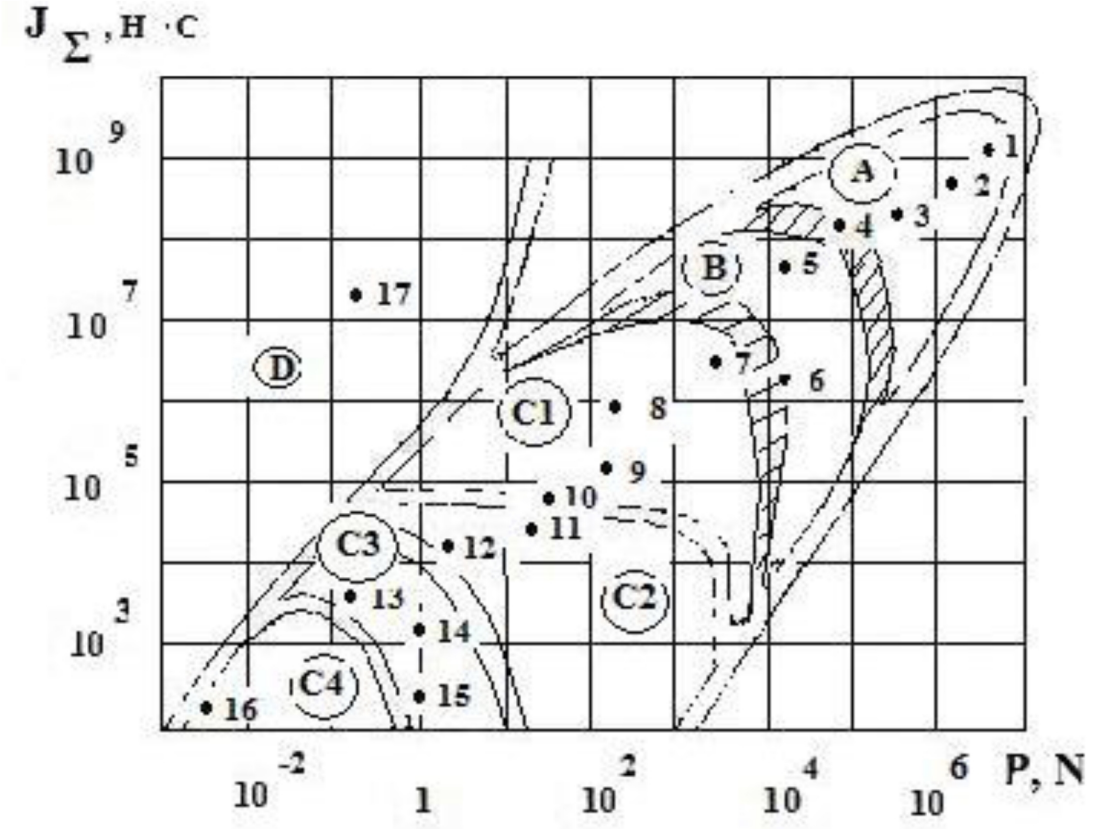

Рисунок 1.1 – Области использования ЖРД в зависимости от величины тяги и суммарного импульса тяги

лям для первых, вторых и третьих ступеней современных ракет-носителей, способных выводить на земную орбиту тяжелые космические аппараты мас-

сой от 10 до 100 тонн. В соответствии с рисунком 1.1 тяга в пустоте этих маршевых ЖРД находится в диапазоне от 10^5 до 10^7 КН.

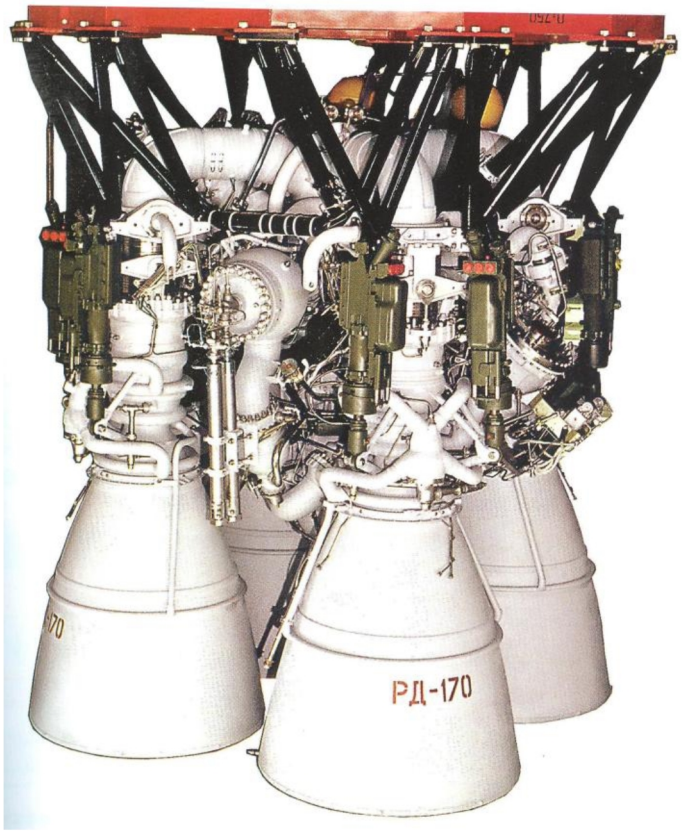

Рисунок 1.2 - Внешний вид маршевого ЖРД РД-170 тягой в пустоте 8060 КН на компонентах топлива керосин и жидкий кислород

В качестве примера на рисунке 1.2 показан внешний вид маршевого жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) РД-170 тягой в пустоте 8060 КН на компонентах топлива керосин - жидкий кислород, разработанного в НПО «Энергомаш» имени акад. В.П. Глушко [1, 2]. Этот ЖРД в составе первой ступени используется в транспортной космической системе «Энергия-Буран», способной выводить на низкую околоземную орбиту полезную нагрузку массой около 120 тонн.

Область В на рисунке 1.1 соответствует ЖРД для разгонных блоков, предназначенных для перевода околоземных космических аппаратов с низких орбит на более высокие орбиты (вплоть до геостационарных), а также перевода космических аппаратов с низкой околоземной орбиты на межпланетные траектории полета. Тяга этих ЖРД находится в диапазоне от 10 до 10^5 КН.

Области C_1 … C_4 соответствуют ЖРД для управления пространственным положением космических аппаратов различной массы – от тяжелых космических аппаратов массой десятки тонн, например, модулей орбитальных космических станций (область C_1, диапазон тяги ЖРД от 10 Н до 10^4 Н) до нано - спутников массой порядка 1 кг (область C_4, диапазон тяги ЖРД от 10^{-3} Н до 1 Н).

Заметим, что ЖРД в диапазоне тяг, соответствующем областям C_1 … C_4 на рисунке 1.1, называются ЖРД малой тяги (ЖРДМТ). На рисунках 1.3 и 1.4 показаны внешний вид и характерные размеры камеры ЖРДМТ тягой порядка 0.1 Н

Рисунок 1.3- Внешний вид камеры ЖРДМТ тягой порядка 0.1 Н

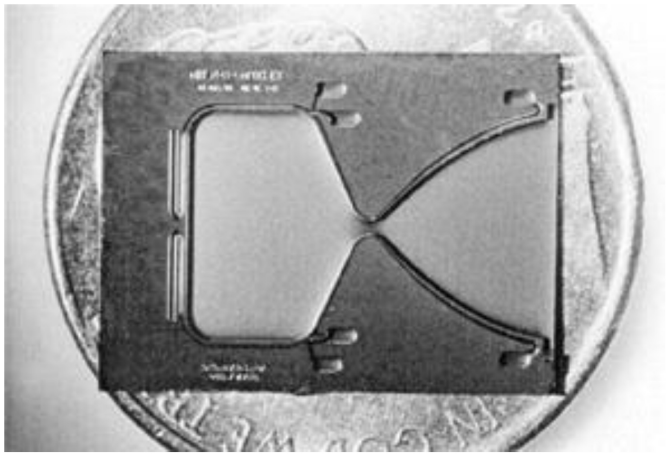

Рисунок 1.4 – Сравнение с мелкой монетой размеров
камеры ЖРДМТ тягой порядка 0.1 Н

Проблема создания таких технических объектов, как ЖРД, заключается, не только в их сложности, но и необходимости обеспечения к ним высоких требований, которые, как правило, имеют противоречивый характер. Например, при создании ЖРД к ним предъявляют такие требования, как обеспечить предельно достижимый высокий уровень топливной экономичности и надежности при минимальных габаритах и массе и низкой стоимости. В современных усло-

виях реализация этих требований диктуется, в том числе, необходимостью обеспечения конкурентоспособности вновь создаваемых ЖРД как на внутреннем, так и внешних рынках. Ключевую роль в обеспечении всех предъявляемых к таким сложным техническим объектам, как ЖРД, требованиям, играет процесс их проектирования.

С развитием автоматизированного проектирования появилась потребность иметь однозначные определения его понятий, а также соответствующую терминологию. В связи с этим в данном разделе излагается ряд основных понятий и терминов. Некоторые из таких определений и терминов регламентируются стандартами, по мере необходимости будут даваться ссылки на эти стандарты. Так, терминология, связанная с ЖРД и ЖРДМТ, регламентируется стандартами [3,4]. Ряд определений и терминов вводится в учебниках, учебных пособиях и монографиях.

Под проектированием технического объекта понимается процесс создания, преобразования и представления в принятой форме описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта [5,6,7]. При этом под описанием понимается образ объекта или его составных частей, который может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться по некоторым алгоритмам в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. Проектирование начинается при наличии технического задания на проектирование, которое отражает потребности общества в получении некоторого технического изделия, сформулированные в виде требований к проектируемому объекту [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Это техническое задание представляется в виде тех или иных документов и является *исходным (первичным) описанием объекта.* Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация представляет собой *окончательное описание объекта и называется* рабочим проектом [6, 7].

С учетом вышеизложенного в [5, 6, 7] дается следующее определение понятия «проектирование»: ***проектирование*** - процесс, заключающийся в преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Преобразование исходного описания в окончательное порождает промежуточные описания, которые являются предметом рассмотрения с целью определения окончания результата проектирования или выбора путей его продолжения. Такие промежуточные описания называют ***проектными решениями*** [6, 7].

Проектирование, при котором все проектные решения получают с помощью ЭВМ без участия человека, называют ***автоматическим***. Автоматическое проектирование было бы идеальным вариантом, однако для его реализации требуется полное, во-первых, полностью формализованное описание процесса проектирования, а, во-вторых, ресурсы ЭВМ, обеспечивающие реализацию этого формализованного описания в приемлемые сроки и с приемлемыми затратам. По причинам, которые детально рассматриваются в разделе 3, автоматическое проектирование таких сложных технических объектов, как жидкостные ракетные двигатели, в настоящее время и в обозримом будущем не представляется возможным.

Проектирование, при котором все или часть проектных решений получают путем взаимодействия человека и ЭВМ, называют ***автоматизированным***, проектирование, при котором ЭВМ не используется, - ***неавтоматизированным.*** Автоматизированное проектирование сложных технических объектов имеет, с одной стороны, очевидные преимущества перед неавтоматизированным, а с другой, соответствует возможностям современных ЭВМ. Однако реализации огромных потенциальных преимуществ автоматизированное проектирования зависит от эффективности процесса взаимодействия человека-проектировщика с ЭВМ и является сложной проблемой. Суть этой проблемы заключается в необходимости сочетать в процессе проектирования формализо-

ванный характер работы ЭВМ как чрезвычайно сложного, но все же чисто технического устройства и неформализованный характер мышления человека. Практика показывает, что наилучшие способы решения этой сложной проблемы предлагает системный подход, в рамках которого проектируемый технический объект рассматривается как система. Сам процесс проектирования также рассматривается как система, а человек-проектировщик и ЭВМ в процессе их взаимодействия рассматриваются как единая человеко-машинная система. В связи с эти в следующем разделе рассматриваются основные понятия о системном подходе применительно к проектированию сложных технических объектов, как ЖРД.

1.2Основные понятия о системном подходе к проектированию сложных технических объектов

Эффективность проектирования таких сложных технических объектов, как маршевые ЖРД, в значительной степени обусловлена использованием системного подхода в виде таких его составляющих, как системотехника и системный анализ. ***Системотехника*** — наука, разрабатывающая методологические основы проектирования сложных технических систем [11]. ***Системный анализ*** – наука, разрабатывающая методологию принятия решений [12, 13]. В данном разделе рассмотрим основные понятия системотехники применительно к автоматизированному проектированию ЖРД, а использование основных понятий системного анализа применительно к автоматизированному проектированию ЖРД рассмотрим в разделах 2 и 3 данного учебного пособия.

В соответствии с системотехникой основными признаками сложной технической системы является наличие [5]:

- определенной цели и назначения системы;
- большого числа составных частей системы, которые могут иметь различную физическую природу;
- сложной структуры системы;

- сложной взаимозависимости между показателями качества системы.

Для ЖРД характерны все основные признаки сложной технической системы.

1. ЖРД является составной частью ЛА, обеспечивающей тягу в соответствии с заданным законом управления ЛА.

2. Для ЖРД характерно наличие большого числа составных частей. Число агрегатов и сборочных единиц в составе двигателя достигает нескольких сотен. В свою очередь, агрегаты и сборочные элементы состоят из множества простых элементов — деталей, которых в двигателе может насчитываться несколько десятков тысяч. Наряду с физическими элементами двигатель как функционирующая система имеет такие составные части, как законы регулирования, законы, определяющие протекание рабочих процессов в камере, ТНА и других подсистемах.

3. Для ЖРД характерно наличие сложной структуры.

Структура является одним из фундаментальных свойств любой системы. Она представляет собой совокупность устойчивых связей и отношений между элементами, обеспечивающих целостность системы и сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях.

Для ЖРД как объекта проектирования характерна сложная иерархическая структура (подробнее в разделе 2). Особенностью ЖРД, как и любой другой системы, является то, что он, являясь системой, включающей множество составных частей и элементов, сам входит как составная часть (или подсистема) в систему более высокого уровня — двигательную установку. В свою очередь, двигательная установка входит в состав ЛА, а ЛА — в состав комплекса ЛА.

Подобная структура сложной системы позволяет рассматривать каждую его составную часть как систему, имеющую определенные связи по вертикали (с подчиняющими и подчиненными элементами) и по горизонтали (с соподчиненными элементами). Более детально структурного аспект в процессе проектирования ЖРД будет рассмотрен в разделе в связи с постановкой проблемы структурного синтеза.

4. К показателям качества ЖРД как технической системы относятся показатели технического совершенства и надежности. В свою очередь, вся совокупность показателей технического совершенства разделяется на ряд групп; в такие группы объединяются показатели энергетического, конструктивного и технологического совершенства двигателя. Наиболее важным проявлением сложной взаимозависимости между показателями качества ЖРД является наличие так называемых конкурирующих показателей качества. Два показателя являются конкурирующими, если улучшение одного из них приводит к ухудшению другого. В ЖРД, как и в других нестационарных энергоустановках, конкурирующими являются показатели энергетического и конструктивного совершенства (например, удельный импульс и относительная масса конструкции двигателя), конструктивного совершенства и надежности (например, масса оболочек камеры и вероятность ее безотказной работы), энергетического совершенства и надежности в тех случаях, когда улучшение показателей энергетического совершенства двигателя сопровождается повышением тепловых и механических нагрузок. Наличие конкурирующих показателей качества ЖРД обусловливает необходимость оптимизации его параметров.

Системотехнический подход заключается в использовании принципов системотехники. В основе системотехнического подхода лежат следующие принципы [5]:

- максимум эффективности системы;
- декомпозиция системы;
- центральное доминирование.

Принцип максимума эффективности гласит, что наилучшим вариантом проектируемой системы является вариант, обладающий наибольшей эффективностью.

Под критерием эффективности системы понимается соотношение или разность двух показателей: показателя ценности конечного результата, получаемого при эксплуатации системы, и показателя затрат на создание и эксплуатацию системы.

Принцип максимума эффективности является наиболее фундаментальным, так как позволяет правильно определить цель проектирования системы и выбрать соответствующую целевую функцию (критерий оптимальности системы).

Принцип декомпозиции заключается в том, что единая проектируемая система разделяется на отдельные части (подсистемы), устанавливаются возможные варианты реализации этих подсистем, связей между ними и на заданном множестве вариантов выбирается структура системы, отвечающая принципу максимума эффективности.

Использование принципа декомпозиции позволяет свести задачу проектирования всей системы в целом к множеству задач проектирования ее подсистем, увязанных в общесистемном плане.

Принцип центрального доминирования позволяет правильно выбрать целевые функции проектируемых подсистем (локальные целевые функции), увязав их в общесистемном плане с целевой функцией системы в целом (с глобальной целевой функцией). Принцип центрального доминирования гласит, что целесообразным является такое состояние подсистем, которое продвигает систему в целом по пути наилучшего достижения ее конечной цели, т.е. интересы целого доминируют над интересами ее частей. Другими словами, в качестве локальных целевых функций должны выбираться такие, при экстремальных значениях которых глобальная целевая функция также принимает экстремальное значение (или близкое к нему), соответствующее наилучшему проектному решению в целом.

Важными следствиями перечисленных принципов системотехники являются следующие:

- целесообразной является совместная оптимизация соподчиненных подсистем (элементов) по общему критерию;
- в качестве критерия оптимальности подсистем следует принимать показатель качества или комплекс показателей качества системы, в которую данные подсистемы входят как подчиненные;

- максимальная эффективность системы достигается путем обеспечения ее рациональной структуры, а не за счет наивысшего качества ее подсистем.

Пренебрежение указанными принципами и их следствиями приводит к серьезным ошибкам в принятии проектных решений. Типичной ошибкой является неправильный выбор критерия оптимальности. Такая ошибка чаще всего связана со стремлением принять в качестве критерия оптимальности проектируемой подсистемы какой-либо ее собственный показатель качества или комплекс таких показателей. Соответствующее решение, которое принято называть локальным решением, конечно позволяет получить наилучшее качество проектируемой подсистемы, однако оно не способствует достижению наилучшего конечного результата, т.е. максимальной эффективности системы в целом [5].

Выше уже отмечалось, что одним из основных принципов системотехнического подхода является декомпозиция. При проектировании такого сложного технического объекта, как ЖРД, необходимо соответствующее этой декомпозиции расчленение по различным аспектам проектирования. Ниже рассматриваются некоторые из этих аспектов, а именно структурно-функциональная декомпозиции объекта проектирования и декомпозиции по времени самого процесса проектирования.

1.3Основные понятия о структурно-функциональной декомпозиции объекта проектирования

Функциональный и структурный аспекты декомпозиции входят в число наиболее крупных и важных аспектов описания проектируемого объекта. Решение задач, связанных с получением и использованием описаний, относящихся к этим аспектам, называют соответственно *функциональными проектированием и структурным проектированием (конструированием)* [5, 6, 7, 14]. Функциональный аспект связан с отображением основных принципов функционирования, характера физических и информационных процессов, протекающих в объекте, и находит выражение в принципиальных, функциональных и кинематиче-

ских схемах, а также в сопровождающих их документах. Структурный (топологический) аспект связан с отображением свойств формы проектируемого объекта, а также свойств элементов, входящих в проектируемый объект и связей между этими элементами. Наилучшей формой представления функционального и структурного аспектов описания проектируемых сложных технических объектов являются функциональные и структурные модели. При этом функциональная модель объекта отображает рабочие процессы функционирования объекта и каждого его блока, а структурная (топологическая) модель отображает связи блоков между собой в составе объекта моделирования. Таким образом, в процессе проектирования на каждом иерархическом уровне необходимо иметь два типа моделей системы: функциональную и структурную.

Естественно, что функциональный и структурный аспекты описания являются взаимосвязанными, что приводит к необходимости обеспечивать взаимосвязь структурных и функциональных моделей. В процессе проектирования эта взаимосвязь проявляется в том, что структурный аспект проектирования (конструирование) связан с реализацией результатов функционального проектирования и связан с определением геометрических форм объектов и их взаимным расположением в пространстве. В процессе проектирования часто возникает необходимость наглядного представления взаимосвязи функциональных и структурных свойств проектируемого сложного технического объекта в виде различных структурно - функциональных схем. В качестве примера на рисунке 1.5 показана пневмо - гидравлическая схема маршевого ЖРД РД - 170 на компонентах топлива керосин - жидкий кислород, а на рисунке 1.6 - структурно – функциональная схема ЖРДМТ на газообразных компонентах топлива кислород и водород, конструкция камеры сгорания и сопла которого показана на рисунках 1.3 и 1.1.4 .

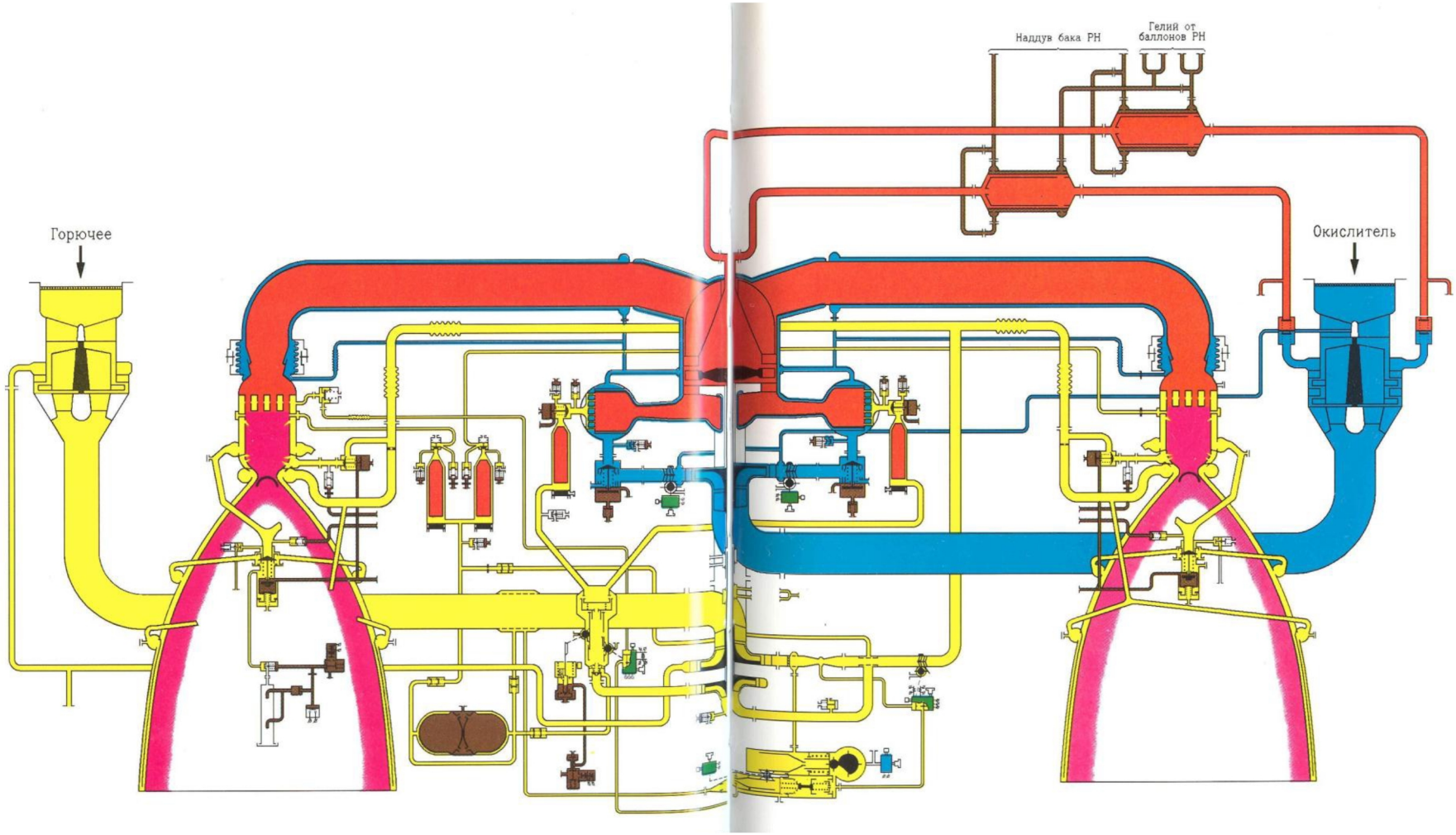

Рисунок 1.5 – Пневмогидравлическая схема маршевого ЖРД РД-170 тягой в пустоте 8060 КН на компонентах топлива керосин-кислород

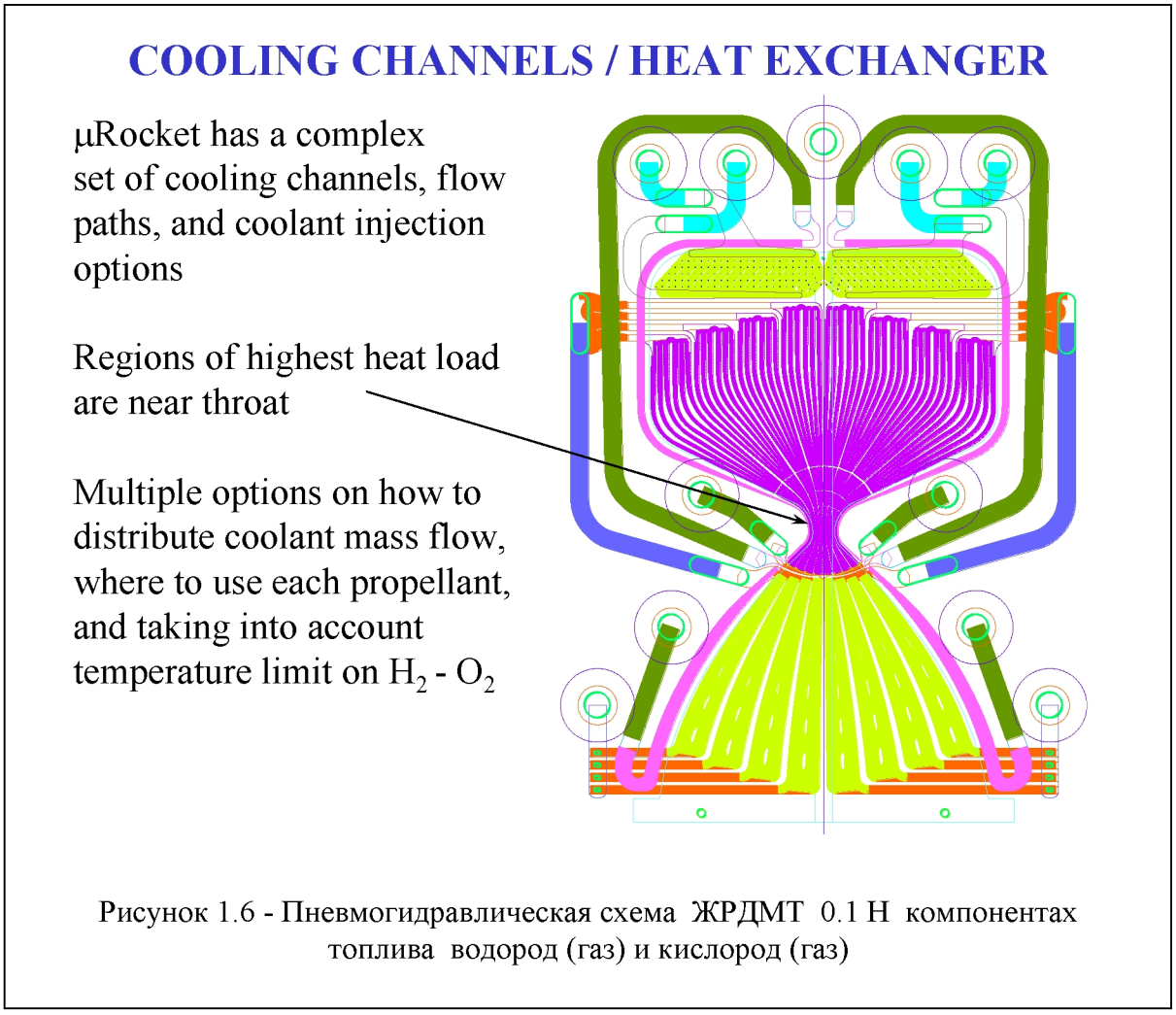

Рисунок 1.6 - Пневмогидравлическая схема ЖРДМТ 0.1 Н компонентах топлива водород (газ) и кислород (газ)

1.4Основные понятия о декомпозиции процесса проектирования сложных технических объектов по времени

Проектирование как процесс, развивающийся во времени, расчленяется на ***стадии, этапы, проектные процедуры и операции*** [15]. *Стадии* являются наиболее крупными составляющими процесса проектирования [16], поэтому ниже излагаются основные сведения об их назначении и содержании.

1.4.1 Стадии научно-исследовательских работ: предпроектная стадия и стадия разработки технических предложений

Процесс проектирования таких сложных технических объектов как ЖРД начинается с предпроектной стадии.

Предпроектная стадия называется также стадией разработки технического задания на создание технического объекта. Техническое задание (ТЗ) — исходный документ на проектирование технического объекта. ТЗ устанавливает основное назначение разрабатываемого объекта, его технические и технико-технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации (конструкторской, технологической, программной и т. д.) и её состав, а также специальные требования [17].

В соответствии с Гражданским кодексом, проектирование — это один из видов подрядных работ, результатом которых является продукция (проект), то есть комплект проектной документации на другой продукт (объект проектирования). Проект предназначен для создания объекта, его эксплуатации, ремонта и ликвидации, а также для проверки или воспроизведения промежуточных и конечных решений, на основе которых этот объект был разработан. Слово «проект» применительно к области деятельности, обозначаемой такими терминами, как «управление проектами» и «управление проектированем», применяется в значении «программа», «план действий», «комплекс работ». Участников проектных работ разделяют на потребителей (*Заказчиков* этих работ) и поставщиков (*Исполнителей* этих работ, подрядчиков). Исполнителя-специалиста называют проектировщиком или разработчиком. Поставщиком, как и потребителем продукции, может быть организация (юридическое лицо) или конкретный человек (физическое лицо).

Техническое задание является юридическим документом — как приложение включается в договор между Заказчиком и Исполнителем на проведение проектных работ и является его основой: определяет порядок и условия работ, в том числе цель, задачи, принципы, ожидаемые результаты и сроки выполнения.

Все изменения, дополнения и уточнения формулировок ТЗ обязательно согласуются с Заказчиком и им утверждаются. Это необходимо и потому, что в случае обнаружения в процессе решения проектной задачи неточностей или ошибочности исходных данных возникает необходимость определения степени вины каждой из сторон - участниц разработки, распределения понесенных в связи с этим убытков.

Исходное задание на разработку ТЗ выдаётся Заказчиком. Основными причинами, заставляющими его обратиться к Разработчику, являются отсутствие у Заказчика соответствующих специальных знаний либо ограниченность его ресурсов (нехватка времени на решение задачи, необходимого количества людей, оборудования). Задание может быть чётко определено, например, когда всю работу ведет один человек, либо оно выдано авторитетным специалистом, либо не может быть подвергнуто сомнению (госзаказ). Но чаще оно формулируется в общих чертах на языке потребителя-неспециалиста, далёким от языка Разработчика и терминов предметной области. Неопределенные требования вызывают неуверенность у всех участников работ, так как допускают различное толкование требований и не позволят объективно оценить качество разработанного изделия. Также Разработчик должен понимать, что Заказчик может не знать (или знает частично) специальных требований, что не снимает с разработчика ответственности и обязательности выполнения требований надзорных органов независимо от их наличия в задании. Таким образом, не только Заказчик, но и Разработчик (исполнитель) являются ответственными за постановку целей разработки и полезность ее результата.

Составление ТЗ — сложная и ответственная задача: многие необходимые данные ещё не известны, но то, как задание будет поставлено, способно облегчить или затруднить последующее проектирование. Специалисты считают, что грамотное ТЗ — это более 50 % успеха в решении задачи, а время, затраченное на подготовку ТЗ, — одно из лучших вложений, которые фирма может сделать в период проектирования. Недаром составление ТЗ поручается ведущим специалистам — главным конструкторам, руководителям проектов и работ и т. п.

Как инструмент коммуникации в связке общения заказчик-исполнитель, ТЗ позволяет:

Обеим сторонам:

- представить (вообразить) готовый продукт,
- выполнить детальную проверку готового продукта (приёмочное тестирование — проведение *испытаний*),
- уменьшить число ошибок, связанных с изменением требований в результате их неполноты или ошибочности (на всех стадиях и этапах создания, за исключением *испытаний*).

Заказчику:

- осознать, что именно ему нужно,
- в том числе, опираясь на существующие на данный момент технические возможности и свои ресурсы,
- требовать от исполнителя соответствия продукта всем условиям, оговорённым в ТЗ.

Исполнителю:

- понять суть задачи, показать заказчику «технический облик» будущего изделия, спланировать выполнение проекта и работать по намеченному плану,
- отказаться от выполнения работ, не указанных в ТЗ.

Несмотря на свою важность, содержание и порядок разработки ТЗ практически не регламентированы нормативными документами в виде ГОСТов. Так, применительно к созданию технических объектов, ГОСТ на разработку ТЗ для этих объектов отсутствует. Существуют лишь стандарта на разработку ТЗ применительно к разработке программной документации, создание автоматизированных систем, а также вычислительных машин и систем обработки данных [18, 19, 20].

Рассмотрим более детально содержание стадии предпроектных исследований, связанных с формирования ТЗ. Решение любой задачи, связанной с созданием сложного технического объекта, начинается с её осмысления и уточне-

ния исходных требований ТЗ. Эти требования, которые выдаются Заказчиком, формулируются на языке потребителя-неспециалиста и не всегда бывают технически четкими и исчерпывающими. Перевести исходные требования на язык предметной области, сформулировать задачу максимально полно и грамотно, обосновать необходимость её решения - это и есть главная цель ТЗ, обязательный этап работы. Исполнитель выполняет его в тесном контакте с Заказчиком. Фактически это означает, что работа Исполнителя над проектом уже началась. В машиностроении этот этап иногда называют *внешним проектированием*.

Как правило, ТЗ составляют на основе анализа результатов предварительных исследований, расчётов и моделирования. При этом работа над составлением ТЗ включает выполнение ряда этапов. А неопределенность, свойственная этой работе, вызывает прохождение их по несколько раз, итерационно, от более общей постановки задачи — к детальной её проработке (проектирование носит итерационный характер и то, что не учтено в начале, может быть учтено на последующих этапах).

При составлении ТЗ важно критически, без предрассудков подойти к исходным требованиям. Для этого необходимо:

- убедиться, действительно ли заявленные потребности ценны для заказчика, правдивы ли исходные данные, какие неблагоприятные или вредные последствия могут возникнуть в процессе реализации этой потребности;
- выяснить суть потребности, отыскать источник её возникновения;
- выяснить, что мешает использованию прежнего изделия для удовлетворения новых потребностей.

Основной причиной, вызывающей необходимость новой разработки, обычно служит наличие *противоречия* между желанием и возможностью удовлетворения *потребности*. Если противоречия нет, то потребность может быть удовлетворена без создания новых изделий. Если кажется, что противоречия нет, но существующее решение не подходит, то это означает, что противоречие в действительности существует, и следует внимательно его поискать. Противо-

речие может быть декомпозировано, то есть представлено в виде элементарных проблем.

После уточнения и обоснования требований ТЗ назначают соответствующие им функции. Чтобы предубеждения и психологическая инерция не сужали область поиска, а Заказчик своей формулировкой задачи не предопределял направления поиска решения, желательно функцию формулировать обобщенно и в нейтральных терминах, чтобы предоставить возможность Исполнителю предлагать более широкий круг возможных решений. В процессе поиска наиболее полной и точной формулировки функций строится цепочка функций (*дерево целей*) — от первоначально предложенной до окончательно принятой. Этому помогает ответ на вопрос «Зачем это нужно?» (и другие вопросы *метода контрольных вопросов*). В большинстве случаев за приведенной в требованиях ТЗ целью стоит необходимость выполнения (последовательно или одновременно) нескольких функций. Цепочка функций строится для каждой из этих целей.

Информация, полученная в процессе уточнения требований ТЗ, должна быть подвергнута анализу. Ниже перечислены основные этапы этого анализа и указано содержание каждого из них.

Обобщение и абстрагирование.

Увязываются и обобщаются отдельные фрагменты, чтобы, по возможности, получилось цельное, ясное и лаконичное представление о разрабатываемом объекте с учетом возможных изменений. Убираются дублирующие сведения, в том числе и такие, которые повторяют друг друга в иных формулировках или являются частным случаем. Абстрагирование предназначено дать такую формулировку требованиям, чтобы избежать предопределения путей решения задачи (не создавать психологических барьеров). Для получения «сильных» решений рекомендуют проводить усиление системы требований и обострение противоречий.

Проверка на противоречивость.

При наличии нескольких функций часть их по своему действию может оказаться противоречивыми (например, вода должна быть горячей (для заварки), но не обжигать руки). Для разрешения противоречий эффективно применение *эвристических методов*. При этом устранение противоречий возможно как на этапе составления ТЗ (изменение формулировок функций, разнесение их действия во времени или в пространстве и т. д.), так и на последующих этапах проектирования.

Условия и ограничения также следует проверять на противоречивость. Так, ограничения могут задавать пустое множество. Подобные противоречия не всегда очевидны: сведения по верхней и нижней границам могут поступать в разное время или помещаться в разных местах ТЗ, быть представлены в неявном виде.

Разграничение требований на условия, ограничения и показатели качества

Представление требований в виде показателей позволяет получить решения с высокими характеристиками, но такая задача решается сложнее. В качестве показателей выбирают те, которые характеризуют наиболее важные свойства (с целью возможности получения наилучших значений). Для вводимых условий необходимо оценить величину разброса и необходимость указания предельных значений, то есть представления их в виде ограничений.

Параметризация.

Точность суждения и верность выбора зависят от степени конкретности исходных требований, представлены ли они в формализованном или неформализованном виде. Для однозначности выводов все требования должны быть переведены в формализованный вид, то есть указаны характеризующие их параметры, причем такие, которые можно измерить, проконтролировать, рассчи-

тать. Это также позволит выделить дублирующие требования (те, которые характеризуются одними и теми же параметрами) и обобщить их (ввести обобщенные параметры с целью сокращения общего их числа, удельные характеристики).

При решении задачи *оптимального проектирования* (более детально содержание этих задач рассмотрено в разделах 2 и 3) рекомендуют показатели качества приводить к критериальному формализованному виду, то есть назначать им численную меру. Основной метод конкретизации формулировок — построение дерева целей (И или ИЛИ - деревья): исходный показатель декомпозируется до выявления элементарных понятий, однозначно характеризуемых наборами параметров. Заметим, что проблемами оценки качества посредством количественных показателей занимается наука «Квалиметрия».

Усечение списка требований.

Большой объем информации хотя и способен дать максимально полное представление о решаемой задаче, но труднее удерживается в голове, усложняет решение задачи. Для сокращения сведений до разумного объема (под способности каждого конкретного разработчика, соответствие его финансовым, организационно-техническим, временным ресурсам) можно воспользоваться их ранжированием или разделением на группы обязательных к учету, желательных и несущественных. К обязательным относятся те, неудовлетворение которых существенным образом влияет на выбор вариантов решений. Это — функциональные параметры, условия взаимосвязи систем и их частей и другие. Желательные требования позволяют различить варианты по степени качества.

Стоит принимать во внимание слова Ли Якокки (выдающегося руководителя, долгое время руководившего корпорации «Форд»): « … беда в том, что ты учился в Гарварде, где тебе вбили в голову, что нельзя предпринимать никаких действий, пока не соберёшь все факты. У тебя 95 % информации, а для того, чтобы собрать недостающие 5 %, тебе понадобится ещё шесть месяцев. За

это время все факты устареют, потому что рынок развивается гораздо быстрее. Самое главное в жизни — всё делать вовремя … главная задача состоит в том, чтобы собрать все важные факты и точки зрения, которые вам доступны. Но в какой-то момент надо начинать действовать решительно. Во-первых, потому, что даже самое правильное решение оказывается неверным, если оно принято слишком поздно. Во-вторых, потому, что в большинстве случаев не существует такой вещи, как полная уверенность. Вам никогда не удастся собрать все 100 % информации. К сожалению, жизнь не будет ждать, пока вы оцените все возможные просчеты и потери. Иногда надо просто двинуться вперед наудачу и исправлять ошибки по ходу движения» [21].

После стадии предпроектных исследований и разработки технического задания в соответствии с [22] выполняется стадия технических предложений. На этой стадии выполняет декомпозицию объекта проектирования и подготавливает частные технические задания на подсистемы на основе выполнения проектных процедур структурного о параметрического синтеза, описание которых приводится в разделах 2 и 3. После выполнения всех этапов технического предложения разработчик согласовывает и утверждает его у заказчика системы, при этом они совместно уточняют исходное ТЗ. После утверждения технического предложения разработчик системы распределяет по соисполнителям частные ТЗ, на основании которых могут вырабатываться частные ТЗ для подсистем более низких уровней. По завершении этапа распределения ТЗ разработчики системы и её подсистем приступают к выполнению стадии эскизного проекта.

Вышеизложенное показывает сложность задач, решаемых на стадиях формирования ТЗ и разработки технических предложений, что обуславливает необходимость творческого подхода к решению этих задач и отнесения этих работ к научно-исследовательским.

1.4.2 Стадии опытно - конструкторских работ: эскизное и техническое проектирование

По завершении этапа разработки технических предложений распределения ТЗ разработчики системы и её подсистем приступают к выполнению стадии эскизного проекта в соответствии с [23]. На этой стадии проверяется корректность и реализуемость основных принципов и положений, определяющих функционирование будущего объекта, и создается его эскизный проект.

Проработка структуры проектируемого объекта на этой стадии ведется при тесном взаимодействии всех разработчиков. В процессе такой работы увязываются между собой отдельные части, согласовываются основные параметры проектируемого объекта. При этом качество проектирования зависит от широты видения Разработчиком проблемы, то есть от его кругозора и способности учесть все связи рассматриваемого объекта, и наличия у него знаний, захватывающих смежные области. В процессе эскизного проектирования и согласования частных решений с общим возможна корректировка ТЗ.

После завершения эскизного проектирования, согласования и утверждения полученных технических решений у заказчика переходят к стадии технического проектирования в соответствии с [24]. На этой стадии выполняется всесторонняя проработка всех частей проекта, конкретизируются и детализируются технические решения, в том числе выполняется вся основная конструктивная проработка объекта и его частей. При этом возможно уточнение технических решений с возвратом на предыдущие стадии, в связи с чем техническое проектирование ведется при тесном взаимодействии всех Разработчиков.

1.4.3 Стадия рабочего проектирования

Совокупность проектных документов представляет собой *проект,* а процесс составления проектных документов - документирование результатов проектирования. Именно этот процесс составляет основное содержание стадии рабочего проектирования, на этой стадии формируется вся необходимая документация для изготовления изделия.

При этом следует иметь в виду, что документирование результатов проектирования является, чрезвычайно трудоемким этапом проектирования, поскольку эта трудоемкость определяется, главным образом, числом разрабатываемых проектных документов. Это число разрабатываемых проектных документов зависит, в свою очередь, от сложности объекта проектирования (количество параметров, деталей, сборочных единиц). В ЖРД число деталей может составлять десятки тысяч, а число сборочных единиц – сотни штук. Поэтому снижение трудоемкости и сокращение затрат на этапе рабочего проектирования является одной из наиболее актуальных проблем.

Вторая, не менее актуальная проблема заключается в том, что разрабатываемая на стадии рабочего проектирования проектная документация должна содержать все многообразные ассоциативные связи между документами и в соответствии с концепцией CALS [25] должна быть удобна в использовании на всех стадиях жизненного цикла создаваемого ЖРД, прежде всего на стадиях технологической подготовки производства и самого производства.

Эффективное решение перечисленных проблем возможно лишь на основе документирование результатов проектирования в виде полного электронного описания изделия в соответствии с [26, 27, 28]. Структурная схема полного электронного описания изделия приведена на рисунке 1.7. Основой такого описания изделия являются описание результатов проектирования в виде CAE/CAD- моделей (эта технология рассматривается в разделах 2 и 3) и размещение этих моделей в PDM - среде (эта технология рассматривается в разделе 4).

1.4.4 Этапы проектирования, проектные процедуры и проектные операции

Применение принципа декомпозиции к стадии проектирования приводит к таким элемента проектирования , как этап, процедура и операция [6, 7]. При этом каждая из стадий проектирования состоит из этапов проектирования, этап

проектирования, в свою очередь, состоит из процедур проектирования, а та – из операций проектирования.

Этап проектирования – часть процесса проектирования, включающая в себя формирование всех требующих описаний проекта, относящихся к одному или нескольким иерархическим уровням и аспектам. Так, проектирование камеры и газогенератора ракетного двигателя расчленяют на этапы термогазодинамического расчета, теплового расчета и расчета на прочность.

1.5Основные понятия о проектных процедурах

Составные части этапа проектирования называют проектными процедурами. Проектная процедура – часть этапа, выполнение которой заканчивается получением проектного решения. Каждой проектной процедуре соответствует некоторая задача проектирования, решаемая в рамках данной процедуры.

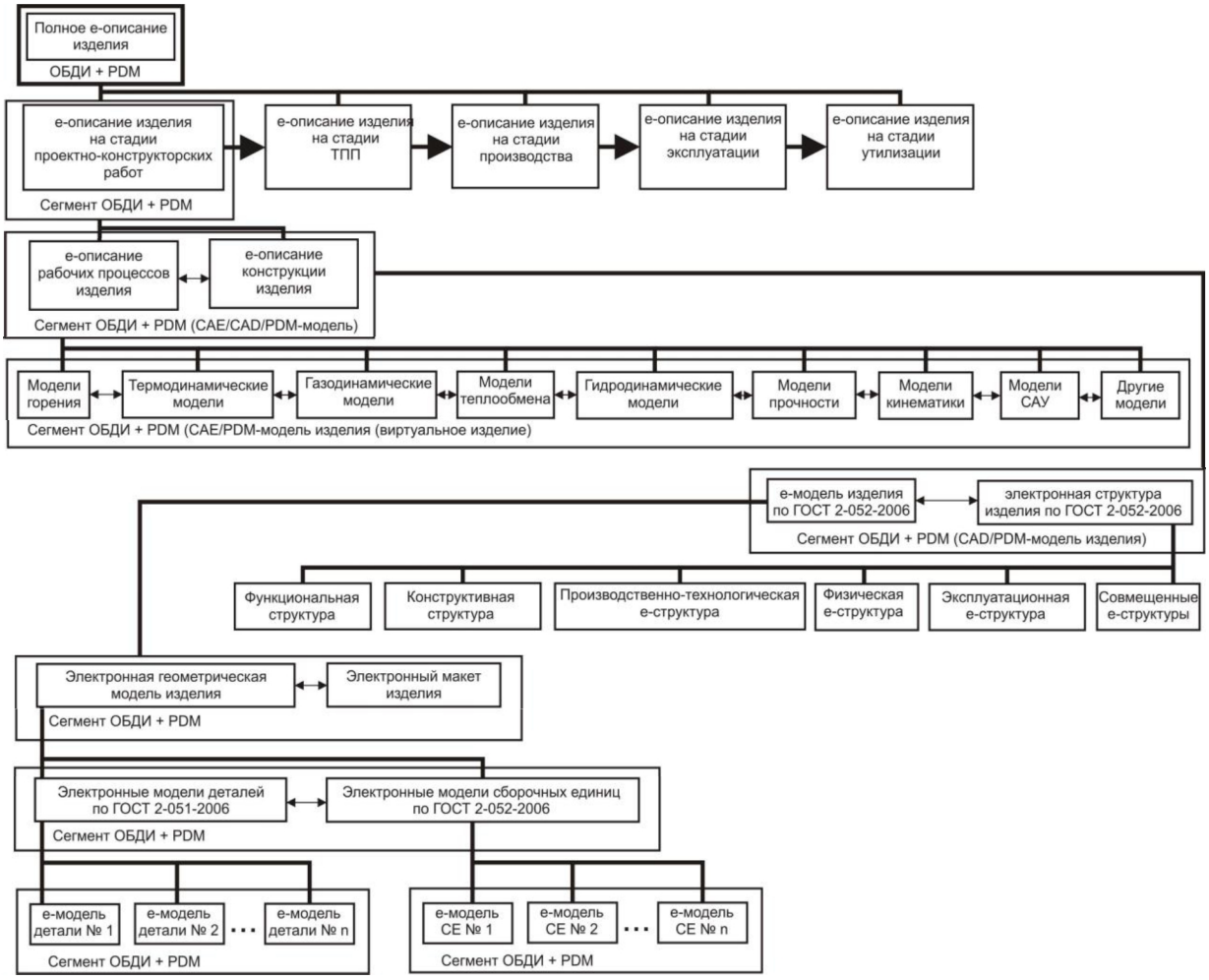

Рисунок 1.7 - Структура полного электронного описания ЖРД

Примерами проектных процедур при термогазодинамическом расчете камеры ракетного двигателя являются выбор оптимального давления в камере сгорания, а также выбор оптимальных величин соотношения компонентов в ядре и пристенке камеры сгорания.

Более мелкие составные части процесса проектирования, входящие в состав проектных процедур, называют проектными операциями. Примерами проектных процедур могут служить: вычерчивание типового графического изображения (зубчатого зацепления, рамки чертежа и т.п.), решение системы линейных алгебраических уравнений стандартным методом (например, методом Гаусса), Таким образом, понятие уровня и аспекта относятся к структурированию представлений о проектируемом объекте, а понятия этапа, проектная

процедура и проектная операция – к структурированию процесса проектирования.

Важную роль в проектировании таких сложных технических объектов, как ракетный двигатель, играет унификация проектных решений и процедур.

Обычно унификация объектов имеет целью улучшение технико-экономических показателей производства и эксплуатации изделий. Использование типовых и унифицированных проектных решений приводит также к упрощению и ускорению проектирования: так, типовые элементы разрабатываются однократно, в различных проектах применяются многократно. Однако унификация целесообразна только в таких классах объектов, в которых из сравнительно небольшого числа элементов предстоит проектирование и изготовление большого числа разнообразных систем. Именно эти разновидности элементов и подлежат унификации. Для таких сложных технических объектов, как ракетные двигатели, состоящих из этих ряда сложных подсистем, в каждом конкретном случае приходиться заново выполнять многоуровневое иерархическое проектирование. В этих условиях целесообразно ставить вопрос не об унификации изделий, а об унификации средств их проектирования и изготовления, в частности об унификации проектных процедур в рамках САПР. Наличие средств автоматизированного выполнения типовых проектных процедур позволяет оперативно создавать проекты новых изделий, а в сочетании со средствами изготовления в условиях ГАП осуществлять оперативное изготовление новых оригинальных изделий.

Проектная процедура называется типовой, если она предназначена для многократного применения при проектировании многих типовых объектов Классификация типовых проектных процедур представлена на рисунке 1.8 [3, 4].

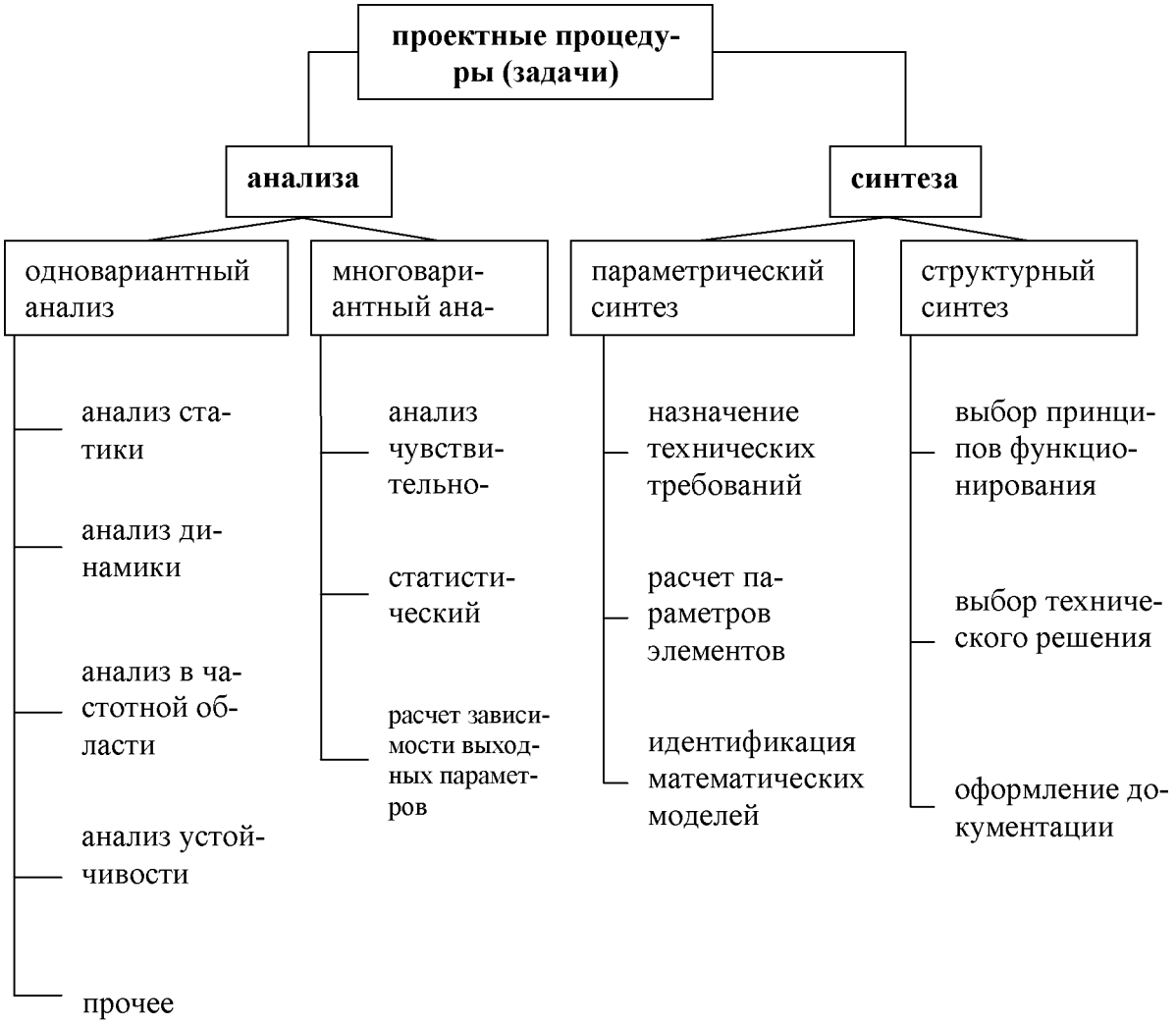

Рисунок 1.8 - Классификация типовых проектных процедур

В соответствии с этой классификацией различают проектные процедуры синтеза и проектные процедуры анализа. Проектная процедура синтеза заключается в создании описания объекта, а проектная процедура анализа – в определении свойств и исследовании работоспособности объекта по его описанию, т.е. при синтезе создаются, а при анализе оцениваются проекты объектов.

В свою очередь, проектные процедуры анализа делятся на проектные процедуры одно- и многовариантного анализа. При одновариантном анализе заданы значения внутренних и внешних параметров, требуется определить значения выходных параметров объекта. Полезно использовать геометрическую интерпретацию этой задачи, связанную с понятием пространства внутренних параметров. Это метрическое n-мерное пространство, в котором для каждого из

n внутренних параметров x_i выделена координатная ось. При одновариантном анализе задается также некоторая точка в пространстве внутренних параметров и требуется в этой точке определить значения выходных параметров. Подобная задача обычно сводиться к однократному решению уравнений, составляющих математическую модель, что и обуславливает название этого вида анализа.

Многовариантный анализ заключается в исследовании свойств объекта в некоторой области пространства внутренних параметров. Такой анализ требует многократного решения систем уравнений (многократного выполнения одновариантного анализа).

Проектные процедуры синтеза делятся на проектные процедуры параметрического и структурного синтеза. Целью структурного синтеза является определение структуры объекта – перечня типов элементов, составляющих объект, и способа связи элементов между собой в составе объекта. Параметрический синтез заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных структуре и условиях работоспособности на выходные параметры объекта, т.е. при параметрическом синтезе нужно найти точку или область в пространстве внутренних параметров, в которых выполняются те или иные условия (обычно условия работоспособности).

Более детальное изложение использования проектных процедур структурного и параметрического синтеза в процессе автоматизированного проектирования ЖРД излагается в разделах 2 и 3.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖРД И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAD-ТЕХНОЛОГИЙ

2.1Постановка задачи структурного синтеза

Структурный синтез заключается в преобразовании описаний проектируемого объекта от исходного до результирующего. Исходное описание содержит информацию о требованиях к свойствам объекта, об условиях его функционирования, ограничениях на элементный состав и т. п., а результирующее описание должно содержать сведения о структуре, т. е. о составе элементов и способах их соединения и взаимодействия, наилучшим образом соответствующие требованиям технического задания. Исходное описание, как правило, представляет собой ТЗ на проектирование, по нему составляют описание на некотором формальном языке, являющемся входным языком используемых подсистем САПР. Затем выполняют преобразования описаний и получаемое итоговое для данного этапа описание документируют — представляют в виде твердой копии или файла в соответствующем формате для передачи на следующий этап.

Сложность задачи структурного синтеза обусловлена, с одной стороны, сложностью самого объекта проектирования, а с другой – высоким уровнем требований технического задания, зачастую имеющих противоречивый характер. Примером является маршевый ЖРД РД - 170 на топливе керосин - жидкий кислород (разработчик ОАО «Энергомаш» имени акад. В.П. Глушко», г. Химки), описание которого приведено в разделе 1, а также маршевый ЖРД НК-33 , описание которого приведено ниже (разработчик «ОАО Кузнецов», г. Самара).

Общий вид ракетного двигателя НК-33 показан на рисунке 2.1, а его пневмогидравлическая схема показана на рисунке 2.2. Двигатель содержит камеру сгорания 1, подключенную, соответственно, по линиям питания горючим и окислительным газом к турбонасосному агрегату 2 и к газогенератору 3. ТНА выполнен одновальным. 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 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 выхлоп из газогенератора - к головке камеры сгорания 1 по линии 24. В процессе работы ЖРД и при его запуске весь расход окислителя подается из насоса по линии 23 на окислительный газогенератор 3.

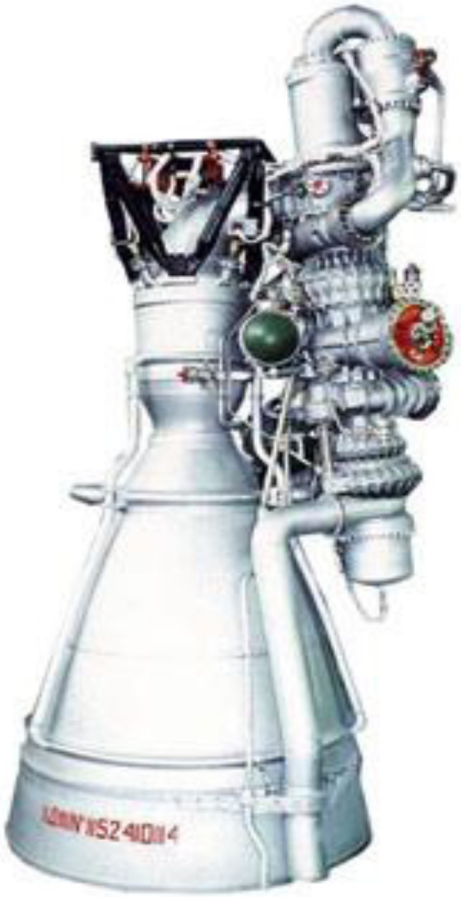

Рисунок 2.1 .- Общий вид ЖРД НК-33

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.

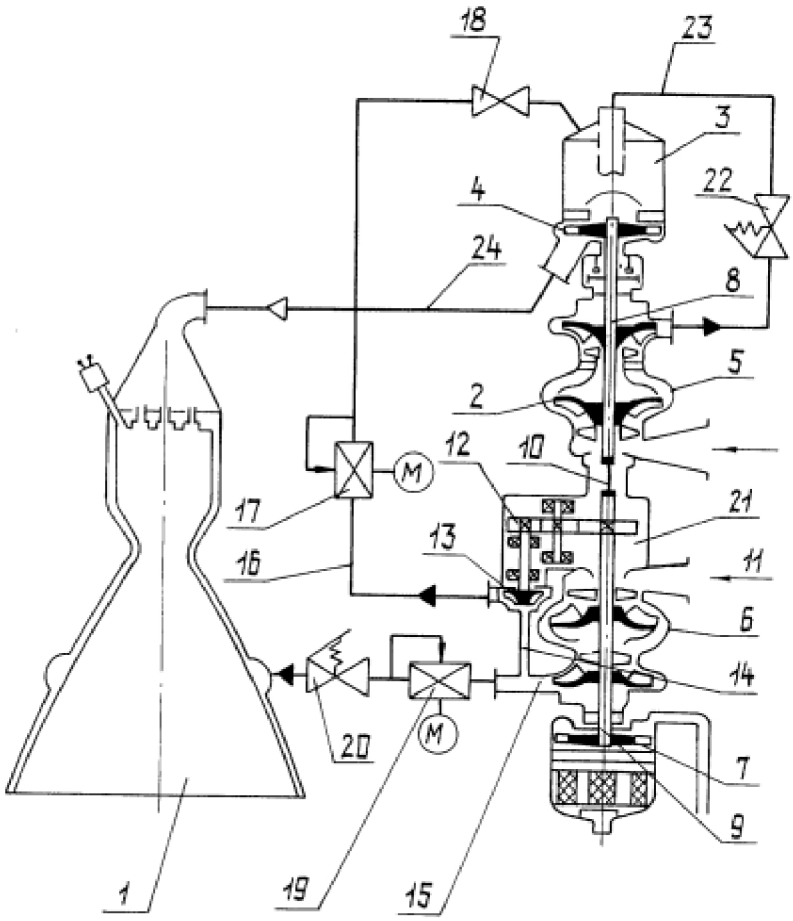

Рисунок 2.2 - Пневмогидравлическая схема ЖРД НК-33

В двигателе использованы прямоточные дифференциальные клапаны управления, автоматически срабатывающие при заданном перепаде давлений компонентов топлива. Для снижения гидроударов и улучшения затухания колебаний давления во входных топливных магистралях двигателей при запуске использованы сильфонные демпферы с продольными гофрами. Для снижения ударных нагрузок, действующих на конструкцию ракеты при выключении двигателей, введен плавный останов двигателей.

Основные процессы включения и выключения двигателя заключаются в следующем. Перед запуском открываются подбаковые клапаны ракеты (на схеме не показаны) и под воздействием гидростатического напора и давления наддува компоненты топлива заполняют полости насосов окислителя и горючего и магистралей до клапанов 18, 20 и 22. Такое состояние считается исходным для запуска двигателя. Пуск двигателя осуществляется с помощью пусковой турбины 7, находящейся на противоположном от основной турби-

ны 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.

Корпус камеры состоит из камеры сгорания и сопла. Корпус камеры включает в себя стальную внешнюю силовую оболочку и бронзовую внутреннюю огневую стенку с фрезерованными каналами, образующими тракт наружного регенеративного охлаждения камеры. Внешняя и внутренняя оболочки соединены пайкой по поверхности ребер между каналами охлаждения. Камера сгорания имеет внутреннее теплозащитное керамическое покрытие, снижающее тепловой поток в стенку, и два пояса внутреннего завесного охлаждения. Входной коллектор горючего, расположенный ниже (по ходу движения газа в камере) минимального сечения, распределяет его на два по-

тока: один - в сторону форсуночной головки, второй - в сторону среза сопла. Затем горючее из коллектора у среза сопла поступает по трубкам перелива в форсуночную головку.

Форсуночная головка камеры включает центробежные форсунки горючего и струйные газовые форсунки окислителя. 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 огневого днища и стенок камеры.

Рассмотренные примеры показывают весьма высокий уровень сложности задачи структурного синтеза применительно к проектированию современных маршевых ЖРД. Эффективное решение таких задач возможно только при использовании современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Однако использованию САПР подразумевает формализованную постановка задачи структурного синтеза. Основой такой формализованной постановки является формулировка проблемы структурного синтеза как математической задачи принятия проектных решений [29]. Эта задача в общем виде формулируется следующим образом [7, 10]:

$$ЗПР = <\mathbf{A}, \mathbf{K}, Мод, П>, \qquad (2.1)$$

где ЗПР - задача принятия решения; **А** — множество альтернатив проектного решения; **К** = $(K_1, K_2, ..., K_m)$ - множество критериев (выходных параметров), по которым оценивается соответствие альтернативы поставленным целям; Мод: $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{K}$ — модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев; П — решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

В свою очередь, каждой альтернативе конкретного приложения можно поставить в соответствие значения упорядоченного множества (набора) атрибутов $\boldsymbol{X} = \langle x_1, x_2, \ldots, x_n \rangle$, характеризующих свойства альтернативы. Множество **X** называют записью (в теории баз данных), *фреймом* (в искусственном интеллекте) или *хромосомой* (в генетических алгоритмах). Модель Мод называют структурно-критериальной, если среди *x*. имеются параметры, характеризующие структуру моделируемого объекта.

Основными проблемами в ЗПР являются [7]:

• компактное представление множества вариантов (альтернатив);

• построение модели Мод: А → К синтезируемого устройства, в том числе выбор степени абстрагирования для оценки значений критериев;

• формулировка предпочтений в многокритериальных ситуациях (т. е. преобразование векторного критерия **К** в скалярную целевую функцию);

• установление порядка (предпочтений) между альтернативами в отсутствие количественной оценки целевой функции (что обычно является следствием неколичественного характера всех или части критериев);

• выбор метода поиска оптимального варианта (сокращение перебора вариантов).

Кратко рассмотрим сущность перечисленных проблем на примере проблемы компактного представление множества вариантов (альтернатив).

Решению проблем упорядочения и описания множества альтернатив и связей между ними в конкретных приложениях посвящена специальная область знания, которую по аналогии с наукой описания множеств животных и растений в биологии можно назвать систематикой.

Простейший способ задания множества А — явное перечисление всех альтернатив. Семантика и форма описания альтернатив существенно зависят от приложения. Для представления таких описаний в памяти ЭВМ и доступа к ним используют информационно-поисковые системы (ИПС). Каждой альтернативе в ИПС соответствует поисковый образ, состоящий из значений атрибутов x_i и ключевых слов вербальных характеристик.

Явное перечисление альтернатив при представлении множества альтернатив возможно лишь при малой мощности А. В большинстве случаев используют неявное описание А в виде способа (алгоритма или набора правил Р) синтеза проектных решений из ограниченного набора элементов Э. Поэтому здесь

$$\mathbf{A} = <\mathbf{Р}, \mathbf{Э}>, \qquad (2.2)$$

а типичный процесс синтеза проектных решений состоит из следующих этапов:

1) формирование альтернативы A_i (это может быть выбор из базы данных ИПС по сформированному поисковому предписанию или генерация из **Э** в соответствии с правилами **Р**);

2) оценка альтернативы по результатам моделирования с помощью модели Мод;

3) принятие решения относительно перехода к следующей альтернативе или прекращения поиска (выполняется лицом, принимающим решение (ЛПР), или автоматически).

Для описания множеств **Р** и **Э** используют следующие подходы:

- морфологические таблицы и альтернативные И – ИЛИ - деревья;
- представление знаний в интеллектуальных системах — фреймы, семантические сети, продукции;
- генетические методы;
- базы физических эффектов и эвристических приемов, применяемые при решении задач изобретательского характера.

Морфологическая таблица (М) представляет собой обобщенную структуру в виде множества функций, выполняемых компонентами синтезируемых объектов рассматриваемого класса, и подмножеств способов их реализации. Каждой функции можно поставить в соответствие одну строку таблицы, каждому способу ее реализации — одну клетку в этой строке. Следовательно, в морфологических таблицах элемент M_{ij} означает j - й вариант реализации i - й функции в классе технических объектов, описываемом матрицей М.

Другими словами, множество альтернатив можно представить в виде отношения М, называемого морфологической таблицей:

$$\mathbf{M} = <\mathbf{X}, \mathbf{R}>, \qquad (2.3)$$

где **X** — множество свойств (характеристик или функций), присущих объектам рассматриваемого типа; *n* — число этих свойств; $\mathbf{R} = < \mathbf{R_1}, \mathbf{R_2}, ..., \mathbf{R_n} >$; $\mathbf{R_i}$ - множество значений (способов реализации) *i*-го свойства, мощность этого множества далее обозначена N_i. При этом собственно множество альтернатив **A** представлено композицией множеств $\mathbf{R_i}$, т. е. каждая альтернатива включает по одному элементу (значению) из каждой строки морфологической таблицы. Очевидно, что общее число альтернатив *к*, представляемых морфологической таблицей, равно

$$\prod_{i=1}^{n} N_i \qquad (2.4)$$

Морфологические таблицы обычно считают средством неавтоматизированного синтеза, помогающим человеку просматривать компактно представленные альтернативы, преодолевать психологическую инерцию. Последнее связано с тем, что внимание лиц, принимающих решение (ЛПР) обращается на варианты, которые без морфологической таблицы оставались бы вне его поля зрения.

Собственно таблица М не содержит сведений о способе синтеза. Однако на базе М возможно построение методов синтеза с элементами алгоритмизации. В таких методах вводится метризация морфологического пространства. Морфологическое пространство составляют все возможные законченные структуры. При этом принимается, что расстояние между структурами C_1 и C_2 есть число несовпадающих элементов (каждая клетка таблицы М есть один элемент). Поэтому можно говорить об окрестностях решений. Далее исходят из предположения о компактности «хороших» решений, которое позволяет вместо полного перебора ограничиваться перебором в малой окрестности текущей точки поиска. Таким образом, гипотеза о компактности и метризация пространства решений фактически приводят к построению математической модели, к которой можно применить методы дискретной оптимизации, например локальные методы.

К недостаткам таблицы М относятся не учет запрещенных сочетаний элементов в законченных структурах и отражение состава элементов в структурах без конкретизации их связей. Кроме того, морфологические таблицы строят в предположении, что множества $\mathbf{R_i}$ взаимно независимы, т. е. состав способов реализации i-ой функции не меняет-

ся при изменении значений других функций. Очевидно, что предположение о взаимной независимости множеств $\mathbf{R_i}$ оправдано лишь в сравнительно простых структурах. Последний недостаток устраняется путем обобщения метода морфологических таблиц — при использовании метода альтернативных (И-ИЛИ) графов.

Суть обобщения состоит в том, что любую морфологическую таблицу можно представить в виде дерева (рисунок 2.3). На рисунке функции показаны ребрами, идущими вниз из вершины М (вершина И), значения функций — множество ребер, идущих вниз из вершин ИЛИ (светлые кружки). Очевидно, что таблица представляет собой множество однотипных объектов, поскольку все они характеризуются одним и тем же множеством функций.

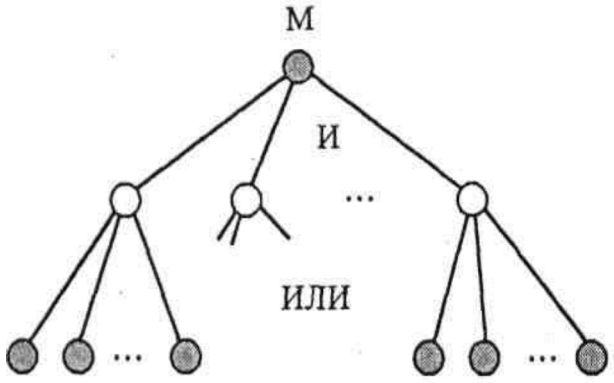

Рисунок 2.3 – Структура графа типа «дерево», соответствующее морфологической таблице

Для разнотипных объектов применяют многоярусные *альтернативные графы.* Например, на рисунке 2.4 показан двухъярусный граф, в котором для разных типов объектов предусмотрены разные подмножества функций.

Если допустить некоторую избыточность при изображении И-ИЛИ-графа, то его можно превратить в И-ИЛИ-дерево, что ведет к определенным удобствам [4]. Отметим, что И-ИЛИ-дерево можно представить как совокупность морфологических таблиц. Каждая И-вершина дерева соответствует частной морфологической таблице, т. е. множеству функций так, что i-я выходящая ветвь отображает *i-ю* функцию. Каждая ИЛИ-вершина, инцидентная i-й ветви, соответствует множеству вариантов реализации i-й функции, при этом j-я исходящая из ИЛИ-вершины ветвь отображает *j-й* вариант реализации.

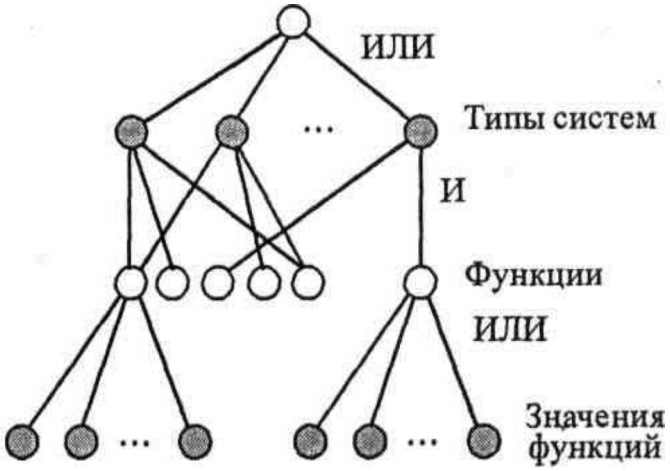

Рисунок 2.4 - Представление структуры в виде И- ИЛИ - графа

Алгоритмизация синтеза на базе И-ИЛИ-деревьев требует введения правил выбора альтернатив в каждой вершине ИЛИ. Эти правила чаще всего имеют эвристический характер, связаны с требованиями ТЗ, могут отражать запреты на сочетания определенных компонентов структур.

Трудности эффективного решения задачи существенно возрастают при наличии ограничений, типичными среди которых являются ограничения на совместимость способов реализации разных функций, т. е. ограничения вида

$$C_{ij} \textbf{ and } C_{pq} = \text{false}, \quad (2.5)$$

где C_{ij} = true, если в оцениваемый вариант вошел элемент $Э_{ij}$, иначе C_{ij} = false. Условие (1.5) означает, что в допустимую структуру не могут входить одновременно элементы $Э_{ij}$ и $Э_{pq}$ Совокупность ограничений типа (2.5) можно представить как систему логических уравнений с неизвестными C_{ij} Тогда задачу синтеза можно решать эволюционными методами, если предварительно или одновременно с ней решать систему логических уравнений (задачу о выполнимости).

В большинстве случаев структурного синтеза вместо нереализуемого явного представления всего множества проектных решений задают множество элементов и совокупность правил объединения этих элементов в допустимые структуры (проектные решения). Эти множества элементов и правил часто представляют в виде формальной системы (исчисления), т. е. задача синтеза имеет вид [7]

$$ЗС = <\mathbf{Э}; \mathbf{НТ}; \mathbf{АК}; \mathbf{П}>, \quad (2.6)$$

где **Э** — алфавит исчисления (алфавит представлен базовыми элементами, из которых синтезируется структура); **НТ** — множество букв, не совпадающих с буквами алфавита **Э** и служащих для обозначения переменных; **АК** — множество аксиом исчисления, под которыми понимаются задаваемые исходные формулы (слова) в алфавите **Э** (например, соответствия функций и элементов); **П** — множество правил вывода новых формул в алфавите **Э** из аксиом и ранее выведенных корректных формул. Каждую формулу можно интерпретировать как некоторую структуру, поэтому синтез — это процесс вывода формулы, удовлетворяющей исходным требованиям и ограничениям.

Другие примеры компактного задания множества альтернатив **А** через множества **Э** и **П** связаны с использованием систем искусственного интеллекта, в которых **Э** есть база данных, **П** — база знаний, или эволюционных методов, в которых **Э** — также база данных, **П** — множество эвристик, последовательность их применения определяется эволюционными и генетическими принципами.

Из вышеизложенного следует, что представление всего множества альтернативных вариантов структуры проектируемого технического объекта на формальном уровне является далеко не тривиальной задачей.

Отметим также, что в применительно к структурному синтезу маршевых ЖРД математическая модель X -> K в виде алгоритма, позволяющего по заданному множеству **X** и заданной структуре объекта рассчитать вектор критериев **К**, оказывается известной далеко не полностью как вследствие сложности самого объекта проектирования, так и по причине сложной структуры критериев оценки результатов этого проектирования. Действительно, типы критериев оценки качество проектирования маршевого ЖРД весьма многообразны и могут охватывать различные аспекты – от технические, производственных и эксплуатационных до экономических, экологических и социально - политических. При этом каждый из перечисленных типов критериев может включать в себя целые группы свойств. Например, технический тип критериев может включать в себя такие группы свойств, как показатели надежности, топливной экономичности, новиз-

ны, габаритно-массового совершенства конструкции и т.д. Кроме того, ряд критериев, таких, например, как топливная экономичность и надежность, являются противоречивыми.

Перечисленные факторы, а также присущая проектным задачам неопределенность и нечеткость исходных данных, а иногда и моделей, диктуют использование специальных методов количественной формулировки исходных неколичественных данных и отношений. Эти специальные методы либо относятся к области построения измерительных шкал, либо являются предметом теории нечетких множеств.

Измерительные шкалы могут быть [7]:

1 - абсолютными;

2 - порядковыми, если между объектами А и *B* установлено одно из следующих отношений: простого порядка, гласящее, что если *A* лучше *B,* то *B* хуже *A* и соблюдается транзитивность; или слабого порядка, т. е. либо *A* не хуже *B,* либо *A* не лучше *B;* или частичного порядка. Для формирования целевой функции F(**X**) производится оцифровка порядковой шкалы, т. е. если при минимизации предпочтительнее *B,* то $F(\boldsymbol{X}_a) < F(\boldsymbol{X}_b)$, где $\boldsymbol{X}_a$ и $\boldsymbol{X}_b$ — множества атрибутов объектов *A* и *B* соответственно;

3 - интервальными, отражающими количественные отношения интервалов: шкала единственна с точностью до линейных преобразований, т. е. $y = ax + b$,, $a >$ О, $-\infty < b < \infty$, или $y = ax$ при $a \neq$ О, или $y = x + b$.

2.2О точном решении задач структурного синтеза

Выбор метода поиска решения задачи принятия решений (2.1) для структурного синтеза - вторая проблема после ее формализованной постановки. Если при формализации все управляемые параметры удалось представить в числовом виде, то можно попытаться применить известные методы дискретного математического программирования (ДМП) .

Задача ДМП определяется следующим образом [7]:

$$\underset{\mathbf{x}\in D}{\text{extr}}\, F(X), \qquad (2.7)$$

$$\mathbf{D} = \{\mathbf{X} \mid \mathbf{W(X)}>0,\ \mathbf{Z(X)} = 0\}, \qquad (2.8)$$

где $F(X)$ — целевая функция; $\mathbf{W(X)}, \mathbf{Z(X)}$ — вектор - функции, связанные с представленными в ТЗ требованиями и ограничениями; **D** — дискретное множество.

В модели (2.7), во-первых, каждый элемент множества рассматриваемых законченных структур должен иметь уникальное сочетание значений некоторого множества числовых параметров, вектор которых обозначен **X**. Во-вторых, необходимо существование одной или нескольких функций **Ф(X)**, значения которых могут служить исчерпывающей оценкой соответствия структуры предъявляемым требованиям. В-третьих, функции **Ф(X)** должны отражать внутренне присущие данному классу объектов свойства, что обеспечит возможность использования **Ф(X)** в качестве не только средств оценки достигнутого при поиске успеха, но и средств указания перспективных направлений продолжения поиска. Эти условия выполнимы далеко не всегда, что и обусловливает трудности формализации задач структурного синтеза.

Однако даже наличие формулировки (2.7) еще не означает, что удастся подобрать метод (алгоритм) решения задачи (2.7) с приемлемыми затратами вычислительных ресурсов [7]. Другими словами, применение точных методов математического программирования вызывает непреодолимые трудности в большинстве случаев практических задач типичного размера из-за их принадлежности к классу так называемых **NP**-трудных задач, который вводится в научной дисциплине, получившей название теории сложности. Ниже излагаются основные элементы этой теории сложности [7].

В теории сложности выделяют массовые и индивидуальные задачи. Первые из них сформулированы в общем виде, вторые представлены с конкретными числовыми значениями исходных данных. Исследования сложности проводятся в отношении массовых задач, и получаемые выводы, как правило, относятся к наихудшему случаю — к наиболее неблагоприятному возможному сочетанию исходных данных. Цель исследований — установление вида зависимости объема Q требуемых вычислений от размера задачи N. Объем вычислений может определяться числом арифметических и логических операций или затратами процессорного вре-

мени ЭВМ с заданной производительностью. Размер задачи в общем случае связывают с объемом описания задачи, но в приложениях понятие размера легко наполняется более конкретным содержанием.

Далее, в теории сложности задач выбора вводят понятия эффективных и неэффективных алгоритмов. К *эффективным* относят алгоритмы с полиномиальной зависимостью Q от N, например, алгоритмы с функцией $Q(N)$ линейной, квадратичной, кубической и др. Для *неэффективных* алгоритмов характерна экспоненциальная зависимость $Q(N)$.

Важность проведения резкой границы между полиномиальными и экспоненциальными алгоритмами вытекает из сопоставления числовых примеров роста допустимого размера задачи с увеличением быстродействия Б используемых ЭВМ (таблица 1.1) , в которой указаны размеры задач, решаемых за одно и то же время Г на ЭВМ с быстродействием Б. при различных зависимостях сложности Q от размера N).

Таблица 2.1. Связь размерности задачи проектирования с потребными вычислительными ресурсами

$Q(N)$	$Б_1$	$Б_2 = 100\ Б_1$	$Б_3 = 1000\ Б_1$
N	N_1	$100\ N_1$	$1000\ N_1$
N^2	N_2	$10\ N_2$	$31{,}6\ N_2$
N^3	N_3	$4{,}64\ N_3$	$10\ N_3$
2^N	N_4	$6{,}64 + N_4$	$9{,}97 + N_4$

Эти примеры показывают, что выбирая ЭВМ в K раз более быстродействующую, получаем увеличение размера решаемых задач при линейных алгоритмах в K раз, при квадратичных алгоритмах в $\sqrt{K}$ раз и т. д.

Иначе обстоит дело с неэффективными алгоритмами. Так, в случае сложности 2^N для одного и того же процессорного времени размер задачи увеличивается только на $\lg K / \lg 2$ единиц. Следовательно, переходя от ЭВМ с Б = 1 Гфлопс к супер ЭВМ с Б = 1 Тфлопс, можно увеличить размер решаемой задачи в 36 раз, что совершенно недостаточно для практических задач.

В теории сложности все комбинаторные задачи разделены на классы:

• класс неразрешимых задач, в него входят массовые задачи, решение которых полным перебором принципиально невозможно с точки зрения современных научных представлений; этот класс отделяется от других задач так называемым пределом Бремермана, оцениваемым величиной $N = 10^{93}$; отметим, что реальный предел неразрешимости значительно ниже;

• класс **P**, к нему относятся задачи, для которых известны алгоритмы решения полиномиальной сложности;

• класс **NP**, включающий задачи, для которых можно за полиномиальное время проверить правильность решения, т. е. ответить на вопрос, удовлетворяет ли данное решение заданным условиям; очевидно, что **P** включено в **NP**, однако вопрос о совпадении этих классов пока остается открытым, хотя, по-видимому, на этот вопрос будет получен отрицательный ответ;

• класс **NP**-полных задач, характеризующийся следующими свойствами:

1) для этих задач не известны полиномиальные алгоритмы точного решения;

2) любые задачи внутри этого класса могут быть сведены одна к другой за полиномиальное время. Последнее означает, что если будет найден полиномиальный алгоритм для точного решения хотя бы одной NP-полной задачи, то за полиномиальное время можно будет решить любую задачу этого класса.

Из результатов теории сложности следуют важные практические рекомендации:

1) приступая к решению некоторой комбинаторной задачи, необходимо сначала проверить, не принадлежит ли она к классу **NP**-полных задач, и если это так, то не следует тратить усилия на разработку алгоритмов и программ точного решения;

2) отсутствие эффективных алгоритмов точного решения массовой задачи выбора отнюдь не означает невозможности эффективного решения индивидуальных задач из класса **NP**-полных или невозможности получения приближенного решения по эвристическим алгоритмам за полиномиальное время.

Опыт решения задач структурного синтеза применительно к проектированию маршевых ракетных двигателей показал [5, 14, 30, 31] , что этот класс задач структурного синтеза относится, как правило, к классу **NP**-полных задач, точное решение которых при существующем уровне вычислительных возможностей ЭВМ практически невозможно. В связи с этим рассмотрим сущность, возможности и перспективы использования приближенных методов решения задач структурного синтеза при проектировании маршевых жидкостных ракетных двигателей.

2.3Приближенные формализованные методы решения задач структурного синтеза

Основу большой группы приближенных математических методов решения задач структурного синтеза, выражающих стремление к сокращению перебора альтернатив, составляют операции разделения множества альтернатив на подмножества и отсечения неперспективных подмножеств. Эти методы объединяются под названием *метода ветвей и границ,* сущность которого заключается в следующем [7]. Пусть имеется множество решений **M**, в котором нужно выбрать оптимальный по критерию $F(X_j)$ вариант, где $\mathbf{X}_j$ — вектор параметров варианта $m_j \in \mathbf{M}$; пусть также имеется алгоритм для вычисления нижней границы $L(\mathbf{M}_k)$ критерия $F(X_j)$ в любом подмножестве $\mathbf{M}_k$ множества **M**, т. е. такого значения $L(M_k)$, что $F(X_j) \geq L(M_k)$ при любом j (подразумевается минимизация $F(X)$). Тогда основная схема решения задач в соответствии с методом ветвей и границ содержит следующие процедуры: 1) в качестве $M_к$ принимаем все множество **M**; 2) ветвление: разбиение $\mathbf{M}_k$ на несколько подмножеств $\mathbf{M}_q$; 3) вычисление нижних границ $L(\mathbf{M}_q)$ в подмножествах $\mathbf{M}_q$; 4) выбор в качестве $\mathbf{M}_k$ подмножества $\mathbf{M}_p$ с минимальным значением нижней границы критерия (среди всех подмножеств, имеющихся на данном этапе вычислений), сведения об остальных подмножествах M и их нижних границах сохраняются в отдельном списке; 5) если $| M_к | > 1$, то переход к процедуре 2, иначе одноэлементное множество $M_к$ есть решение.

Метод ветвей и границ в случае точного вычисления нижних границ относится к точным методам решения задач выбора и потому в неблагоприятных ситуациях может приводить к экспоненциальной временной сложности. Однако метод часто используют как приближенный, поскольку можно применять приближенные алгоритмы вычисления нижних границ.

Среди других приближенных методов решения задачи ДМП отметим *метод локальной оптимизации.* Так как пространство **D** метризовано, то можно использовать понятие α - окрестности S_a ($\mathbf{X}_k$) текущей точки поиска $\boldsymbol{X}_к$. Вместо перебора точек во всем пространстве D осуществляется перебор точек только в S_a $(\boldsymbol{X}_k)$. Если $F(\boldsymbol{X}_j) > F(\boldsymbol{X}_k)$ для всех $\mathbf{X}_j \in S_a$ $(\boldsymbol{X}_k)$, то считается, что найден локальный минимум целевой функции в точке $\boldsymbol{X}_к$. В противном случае точку $\mathbf{X}_q$, в которой достигается минимум $F(\boldsymbol{X})$ в S_a $(\boldsymbol{X}_k)$ принимают в качестве новой текущей точки поиска.

Среди приближенных методов решения задачи (1.7) часто используемым является метод локальной оптимизации. Так как пространство **D** метризовано, то можно использовать понятие α -окрестности S_a $(\boldsymbol{X}_k)$ текущей точки поиска $\boldsymbol{X}_к$. Вместо перебора точек во всем пространстве **D** осуществляется перебор только в S_a $(\boldsymbol{X}_k)$. Если $F(X_j) > F$ (X_k) для всех $\mathbf{X}_j \in S_a$ $(\boldsymbol{X}_k)$, то считается, что найден локальный минимум целевой функции в точке $\boldsymbol{X}_к$. В противном случае точку $\mathbf{X}_q$, в которой достигается минимум $F(\boldsymbol{X})$ в $S_a(X_k)$, принимают в качестве новой текущей точки поиска. Недостатком метода является его явно выраженная локальность — «застревание» в окрестностях локальных экстремумов. Повысить эффективность поиска можно с помощью метода оптимизации с запретами (tabu search). Для этого в S_a $(\boldsymbol{X}_k)$ вводят запреты на попадание в некоторые точки. Обычно это запреты на повторное исследование точек, пройденных на нескольких последних шагах оптимизации. Запрет распространяется и на лучшую точку $\boldsymbol{X}_к$ предыдущего шага, которая может оказаться точкой локального минимума. Тогда на данном шаге перемещение происходит в лучшую незапрещенную точку $\boldsymbol{X}_{k+1}$ несмотря на то что $F(\boldsymbol{X}_{k+1}) > F(\boldsymbol{X}_k)$. Тем самым появляется тенденция к выходу из области притяжения локального экстремума.

Большую и весьма перспективную группу приближенных методов решения задач структурного синтеза составляют эволюционные методы (ЭМ) [7, 32]. Эти методы предназначены для поиска предпочтительных решений и основаны на статистическом подходе к исследованию ситуаций и итерационном приближении к искомому состоянию систем. В отличие от точных методов математического программирования, ЭМ позволяют находить решения, близкие к оптимальным, за приемлемое время, а в отличие от известных эвристических методов оптимизации характеризуются существенно меньшей зависимостью от особенностей приложения (т. е. они более универсальны) и в большинстве случаев обеспечивают лучшую степень приближения к оптимальному решению.

Важнейшим частным случаем ЭМ являются генетические методы и алгоритмы. *Генетические алгоритмы* (ГА) основаны на поиске лучших решений с помощью наследования и усиления полезных свойств множества объектов определенного приложения в процессе имитации их эволюции. Свойства объектов представлены значениями параметров, объединяемыми в запись, называемую в ЭМ *хромосомой.* В ГА оперируют хромосомами, относящимися к множеству объектов — популяции. Имитация генетических принципов — вероятностный выбор родителей среди членов популяции, скрещивание их хромосом, отбор потомков для включения в новые поколения объектов на основе оценки целевой функции — ведет к эволюционному улучшению значений целевой функции (функции полезности) от поколения к поколению.

Примеры использования приближенных формализованных методов решения задач структурного синтеза применительно к проектированию ракетных и газотурбинных двигателей приводятся в ряде работ [5, 14, 15, 30, 31,33, 34, 35, 36] , охватывающих период с 1979 по 2012 г. На начальном этапе этого периода с 1979 г по 2000 год в основном делались попытки использовать для структурного синтеза табличную форму описания алгоритма выбора конструктивных схем двигателя и его составных частей при автоматизированном проектировании [5, 30, 31, 33], однако широкого распространения в практике проектирования ракетных двигателей эти методы не получили. В настоящее время весьма интенсивные усилия прикладываются в развитии фор-

мализованных методов структурного синтеза на основе использования генетических алгоритмов [32, 33], однако примеры успешного использования этих методов в практике проектировании маршевых ЖРД до настоящего времени отсутствуют.

2.4Основные понятия о системном подходе к решению задач структурного синтеза при автоматизированном проектировании ЖРД

В силу изложенных выше причин непосредственное использование формализованных процедур структурного синтеза применительно к проектированию маршевых ракетных двигателей носит лишь качественный и вспомогательный характер [1, 5, 7, 31]. На практике основой структурного синтеза при проектировании маршевых ракетных двигателей в настоящее время является использование в рамках системного подхода следующих неформальных процедур [1, 8, 9, 5, 7, 10, 14]:

- блочно-иерархическая декомпозиция объекта проектирования, в рамках которой общая задача структурного синтеза проектируемого объекта сводится к цепочке частных задач структурного синтеза;

- широкое использование в процессе решения задач структурного синтеза апробированных ранее структур (прототипов);

- широкое использование итерационных процедур при решении частных задач структурного синтеза, а также применение эвристических методов для нахождения новых решений частных задач структурного синтеза, которые часто реализуются как изобретательские задачи.

Рассмотрим более детально порядок использования изложенных неформальных процедур, начиная с процедуры блочно - иерархической декомпозиции.

Разделение описаний по степени детализации отображаемых свойств и характеристик объекта лежит в основе блочно-иерархического подхода к проектированию и приводит к появлению иерархических уровней (уровней абстрагирования) в представлениях о проектируемом объекте. Обобщенная схема блочно - иерархической структурной декомпозиции сложного технического объекта приведена на рисунке 2.5 [6].

В соответствии с этой схемой на каждом иерархическом уровне используются свои понятия системы и элементов. На уровне 1 (верхнем уровне) подлежащий проектированию сложный объект S рассматривается как система S из n взаимосвязанных и взаимодействующих элементов S_i. Каждый из элементов в описании уровня 1 представляет собой также довольно сложный объект, который, в свою очередь, рассматривается как система S_i на уровне 2. Элементами систем S_i являются объекты S_{ij}, j=1, 2, ..., m_i (m_i - количество элементов в описании системы S_i). Как правило, выделение элементов S_{ij} происходит по функциональному признаку (на примере структурной декомпозиции ЖРД это показано на рисунке 2.7). Подобное разделение продолжается вплоть до получения на некотором уровне элементов, описания которых дальнейшему делению не подлежат. Такие бесструктурные элементы по отношению к объекту S называют *базовыми элементами.* Таким образом, *принцип иерархичности* означает структурирование представлений об объектах проектирования по степени детальности описаний, а *принцип структурной декомпозиции (блочности)* - разбиение представлений каждого уровня на ряд составных частей (блоков) с возможностями раздельного (поблочного) проектирования объектов S_i на уровне 1, объектов S_{ij} на уровне 2 и т. д.

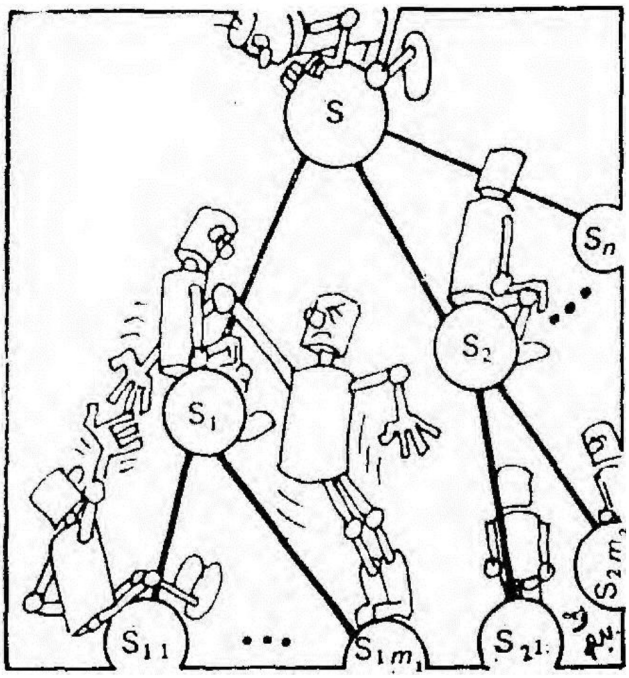

Рисунок 2.5 - Схема блочно-иерархической декомпозиции сложного технического объекта

В *машиностроении* базовые элементы представлены *деталями.* Примерами деталей являются вал, корпус и крыльчатка насоса окислителя, диск и лопатка турбины. Детали рассматриваются как элементы, фигурирующие в опи-

саниях низшего иерархического уровня, на котором системами являются *сборочные единицы* (например, смесительная головка камеры сгорания, насосы окислителя и горючего, турбина ТНА и т.д). Иногда базовыми элементами таких систем могут быть не только детали, но и объекты, состоящие из многих деталей и получаемые на данном предприятии как законченные комплектующие изделия (например, подшипники качения, реле и т.п.). Сборочные единицы являются элементами *агрегатов* (*комплексов*) – систем следующего иерархического уровня (например, камеры, турбонасосного агрегата, газогенератора). В качестве примера агрегата на рисунке 2.6 показан внешний вид газогенератора маршевого ЖРД РД-170, который входит в состав турбонасосного агрегата этого ЖРД.

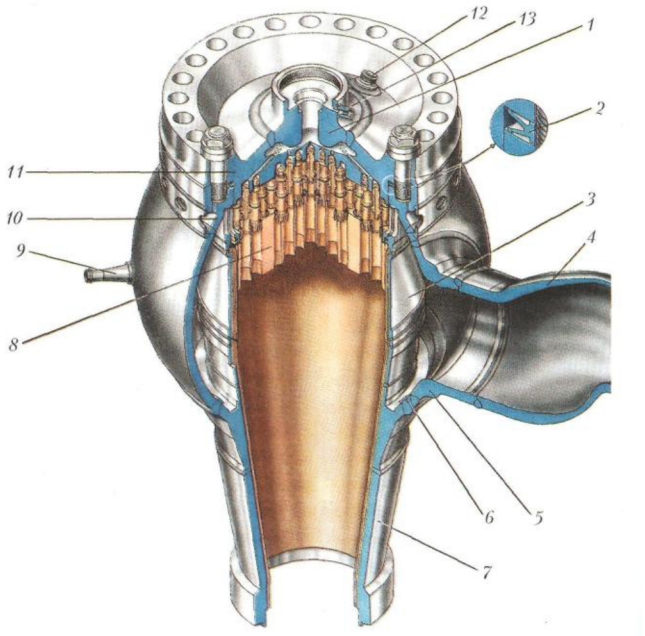

Рисунок 2.6- Внешний вид газогенератора маршевого ЖРД РД-170

Удобство блочно-иерархического подхода состоит в том, что сложная задача большой размерности разбивается на последовательно решаемые задачи малой размерности, а внутри групп разные задачи могут решаться параллельно.

В качестве примера на рисунке 2.7 рассмотрена схема иерархических уровней ракеты [8], в состав которой входит двигательная установка (ДУ), которую предстоит спроектировать. Представления об объекте моделирования разбиты на шесть уровней. Первые два уровня отражают представления о ДУ проектировщиков дан-

ной ракеты, которые являются потенциальными заказчиками для двигателестроительного КБ.

На *первом* уровне иерархии (задача баллистика) в представлении заказчика ракета выступает как тело переменной массы, к которому приложена некоторая реактивная сила, определяющая траекторию полета. Исходя из целей и задач полета ракеты, баллистик выбирает компоненты топлива, тягу двигателей, удельный импульс тяги, массу двигателя.

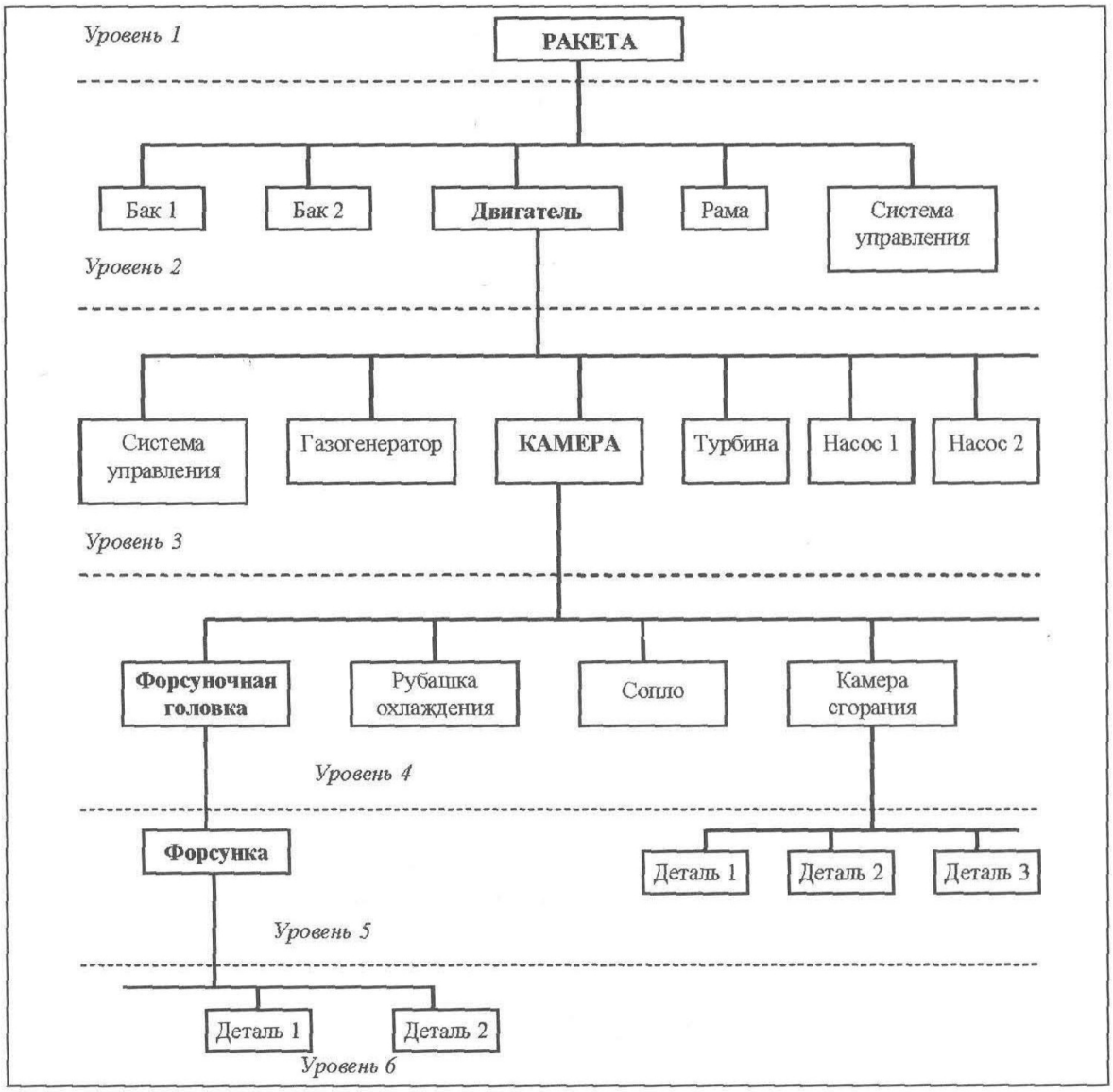

Рисунок 2.7 - Иерархическая структура проектирования ЖРД в составе ДУ ЛА

На *втором* уровне иерархии (задача ракетчика) ДУ выступает уже как блок будущей ракетной системы. На этом уровне у ракетчика имеются определенные представления о работе ДУ. В рамках этих представлений он формулирует требования к

ДУ, в соответствии с которыми формируется техническое задание для двигателиста на разработку ДУ. Вместе с техническими требованиями на двигатель ракетчик должен передать двигателисту критерии отбора наилучшего варианта ДУ.

На *третьем* (задача двигателиста) и последующих уровнях двигательная установка выступает как система, состоящая из определенного набора блоков (агрегатов). При этом формируется некоторая концепция будущей схемы двигателя, на основе определенных представлений двигателиста о работе ДУ разрабатываются требования к основным блокам будущего двигателя (камере сгорания и соплу, форсуночной головке, турбине, насосам, газогенератору и т.д.).

Четвертый уровень (задача агрегатчика) — уровень эскизного проектирования основных узлов и агрегатов двигателя, проверка возможности функционирования двигателя в рамках выбранных конструктором технических решений.

Пятый уровень — это первый уровень детализации проекта.

На *шестом* уровне разрабатывается технология изготовления ДУ (это уровень производственников).

Таким образом, результатом блочно-иерархической декомпозиции является разделение проектируемого объекта на подсистемы в виде иерархической структуры. На верхнем уровне этой структуры блочно-иерархической декомпозиция применяется к летательному аппарату в целом (ракеты-носителя, разгонного блока или космического аппарата) и ЖРД является лишь одним из элементов этого летательного аппарата. На следующем уровне иерархической структуры блочно-иерархическая декомпозиция применяется уже к самому ЖРД. Результатом этой декомпозиции является представление ЖРД как совокупности взаимосвязанных крупных подсистем. Обычно эта декомпозиция осуществляется, в основном, на функциональной основе и каждая из выделенных подсистем отвечает за определенный функционал. Так, для маршевых ЖРД на топливе керосин-кислород на верхнем уровне иерархии наиболее рациональным является выделение следующих крупных подсистем: камера, система хранения топлива, система подачи топлива (например, ТНА), система автоматического регулирования. Функциональное назначение каждой из этих подсистем являет-

ся очевидным. В соответствии с терминологией [14] на верхнем уроне иерархии каждая из перечисленных подсистем ЖРД представляется как комплекс сборочных единиц (СЕ), или структурный элементы (СЭ) нулевого уровня. На следующем, более низком уровне иерархии (назовем его первым) блочно-иерархическая декомпозиция применяется к каждому структурному элементу нулевого уровня. Например, камера двигателя как СЕ нулевого уровня рассматривается на первом иерархическом уровне в виде совокупности таких СЕ, как камера сгорания и сопло, а ТНА рассматривается на этом же уровне в виде совокупности таких СЕ, как насос горючего, насос окислителя, турбина и газогенератор. В рамках изложенной вертикальной блочно-иерархической декомпозиции процесс идет до тех пор, пока на нижнем уровне иерархии для каждой СЕ не окажутся такие бесструктурные элементы, как детали. Декомпозиция может осуществляться не только по иерархическим уровням (по вертикали), но и на одном иерархическом уровне (по горизонтали) [14]. При такой декомпозиции, блок-схема которой показана на рисунке 2.8, вначале выделяются структурные элементы по функциональному назначению (этап А), затем структурные элементы рассматриваемого иерархического уровня данного функционального назначения разделяются по классификационному признаку (свойству) s (этап Б). Это и есть классификация структурных элементов одного функционального назначения. Более детальное описание этой классификации изложено в [14].

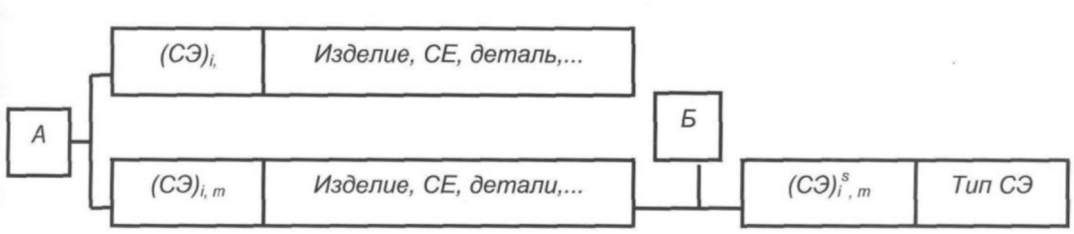

Рисунок 2.8 – Блок-схема декомпозиции на горизонтальном уровне

Наличие иерархических уровней структуры сложного объекта проектирования приводит к понятиям **нисходящего и восходящего проектирования**.

Если решение задач более высоких иерархических уровней предшествует решению задач более низких иерархических уровней, то ***проектирование называют нисходящим.*** Если раньше выполняются этапы, связанные с низшими иерархическими уровнями, ***проектирование называется восходящим.***

У каждого из этих двух видов проектирования имеются преимущества и недостатки. При ***нисходящем*** проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не определены и, следовательно, сведения о их возможностях и свойствах носят предположительный характер. Действительно, при нисходящем проектировании система разрабатывается, когда еще не спроектированы ее блоки. При этом могут быть сформулированы нереализуемые технические требования для блоков нижележащего уровня. Ошибки выясняются при переходе на этот уровень, исправляются путем повторного выполнения предыдущих этапов. При ***восходящем*** проектировании, наоборот, элементы проектируются раньше системы, и, следовательно, предположительный характер имеют требования к элементам. В обоих случаях из-за отсутствия исчерпывающей исходной информации имеют место отклонения от потенциально возможных оптимальных технических результатов. Однако нужно помнить, что подобные отклонения неизбежны при блочно-иерархическом подходе к проектированию и что какой-либо приемлемой альтернативы блочно-иерархическому подходу при проектировании сложных объектов не существует. Поэтому оптимальность результатов блочно-иерархического проектирования следует рассматривать с позиции технико-экономических показателей, включающих в себя, в частности, материальные и временные затраты на проектирование.

Поскольку принимаемые предположения могут не оправдаться, часто требуется повторное выполнение проектных процедур предыдущих этапов после выполнения проектных процедур последующих этапов. Такие повторения обеспечивают последовательное приближение к оптимальным результатам и обуславливают ***итерационный характер проектирования***. Следовательно,

итерационность нужно относить к важным принципам проектирования сложных объектов.

На практике обычно сочетают восходящее и нисходящее проектирование. Например, восходящее проектирование имеет место на всех тех иерархических уровнях, на которых используются унифицированные элементы. Очевидно, что унифицированные элементы, ориентирование на применение в ряде различных систем определенного класса, разрабатываются раньше, чем та или иная конкретная система из этого класса.

С нисходящим и восходящим видами проектирования связаны такме понятия, как ***внешнее и внутреннее проектирование.*** При нисходящем проектировании формулировка ТЗ на разработку элементов k-того иерархического уровня относится к проектным процедурам этого же уровня. Иначе обстоит дело с разработкой ТЗ на систему внешнего иерархического уровня или на унифицированную систему элементов, предназначенную для многих применений. В разделе 1 отмечалось, что разработка ТЗ является самостоятельным этапом проектирования, часто называемым ***внешним проектированием***. В отличие от него этапы проектирования объекта по сформулированным ТЗ называют ***внутренним проектированием***.

Таким образом, на начальных стадиях проектирования сложных систем имеет место итерационный прогресс, в котором поочередно выполняются процедуры внешнего и внутреннего проектирования – формулировка ТЗ, его корректировка, оценка выполнимости, прогноз материальных и временных затрат на проектирование и изготовление. Чтобы правильно спроектировать сложный технический объект, у проектировщика на каждом иерархическом уровне должны быть четкие представления о работе разрабатываемой системы и каждого ее отдельного блока, о характере взаимодействия блоков друг с другом

Необходимость использования итерационных процедур обусловлена также взаимосвязанностью процедур структурного и параметрического синтеза, которая в общем виде показана на рисунке 2.9, а также значительной сложностью этих процедур.

На рисунке 2.9 представлена типичная последовательность проектных процедур анализа и синтеза на одном из этапов нисходящего проектирования [6, 9].

На предыдущем этапе решались задачи k-го иерархического уровня, одним из результатов решения этих задач при нисходящем проектировании является формулировка ТЗ на проектирование систем (k+1)-го рассматриваемого уровня.

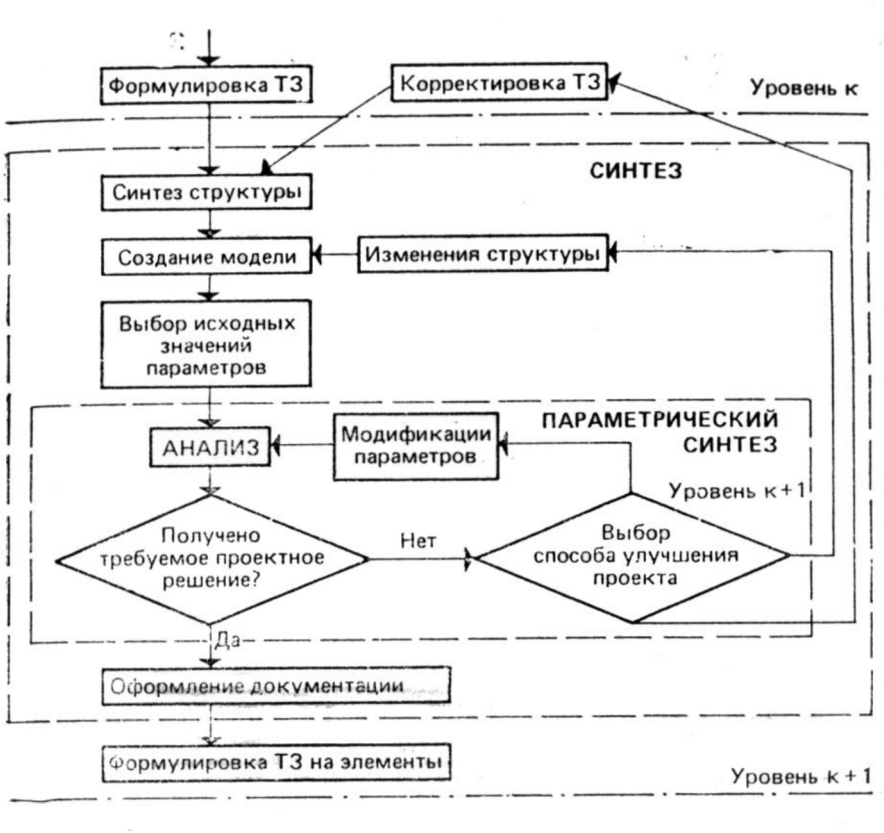

Рисунок 2.9- Схема взаимосвязи процедур структурного и параметрического синтеза

В соответствии с рисунком 2.9 проектирование системы начинается с синтеза исходного варианта ее структуры. Для оценки этого варианта создается модель: математическая – при автоматизированном проектировании, экспериментальная или стендовая – при неавтоматизированном проектировании. После выбора исходных значений параметров элементов выполняется анализ варианта, по результатам которого становится возможной его оценка. Обычно оценка заключается в проверке выполнения условий работоспособности, сформулиро-

ванных в ТЗ. Если условия работоспособности выполняются в должной мере, то полученное проектное решение принимается, система (k+1)-го уровня описывается в принятой форме и формулируется ТЗ на проектирование элементов данного уровня (т.е. систем следующего уровня). Если же полученное проектное решение неудовлетворительно, выбирается один из возможных путей улучшения проекта.

Обычно проще всего осуществить изменение числовых значений параметров элементов структуры, составляющих вектор **X**. Совокупность процедур модификации вектора X, анализа и оценки результатов анализа представляет собой процедуру параметрического синтеза. Если модификации X целенаправленны и подчинены стратегии поиска наилучшего значения некоторого показателя качества, то процедура параметрического синтеза является процедурой оптимизации. Возможно, что путем параметрического синтеза не удастся добиться приемлемой степени выполнения условия работоспособности. Тогда используют другой путь, связанный с модификациями структуры. Новый вариант структуры синтезируется, и для него повторяются процедуры формирования модели и параметрического синтеза. Если не удастся получить приемлемое проектное решение на этом пути, то ставится вопрос о корректировке ТЗ, сформулированного на предыдущем этапе проектирования. Такая корректировка может потребовать повторного выполнения ряда процедур k - го иерархического уровня, что и обуславливает итерационный характер проектирования.

Поскольку процедуры структурного и параметрического синтеза играют ключевую роль в проектировании сложных технических объектов, далее содержание этих процедур и проблемы, связанные с их практической реализацией, рассматриваются более детально применительно к формированию проектного облика маршевых ЖРД на топливе керосин и жидкий кислород.

Причины сложности проектных процедур структурного синтеза были рассмотрены выше, а детальный анализ причин сложности проектных процедур параметрического синтеза рассматривается в следующем разделе.

Широкое использование в процессе решения задач структурного синтеза апробированных ранее структур (прототипов) обусловлено следующими причинами [14]. Во-первых, лишь при соблюдении этого принципа возможны: качественное проектирование, бездефектное изготовление, быстрая доводка и форсирование ДЛА. Использование в новых разработках старых проверенных решений и элементов конструкции способствует создания новых ДЛА в короткие сроки. По существу принцип использования прототипов является принципом преемственности, когда применяются проверенные практикой, хорошо зарекомендовавшие себя проектные, расчётные, конструкторские, технологические, эксплуатационные и другие решения при создании новых изделий.

С другой стороны, всё более жёсткие тактико-технические требования к вновь создаваемым изделиям, а также необходимость улучшения показателей технического совершенства и надёжности ДЛА и ЛА требуют разработки и введения новых конструктивных структурных элементов. Отсюда возникает необходимость применения эвристических методов для нахождения новых решений частных задач структурного синтеза, которые часто реализуются в виде изобретений и защищаются патентами, являясь интеллектуальной собственностью.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что задачи структурного синтеза проектируемых сложных технических объектов, к которым относятся и ЖРД, относятся к числу наиболее трудно формализуемым. Существует ряд общих подходов к постановке этих задач, однако практическая реализация большинства из них не очевидна. Поэтому, используя образное выражение [7], «имеются лишь «островки» автоматического выполнения процедур синтеза среди «моря» проблем, ждущих автоматизации». Именно по этой причине структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера - разработчика, а ЭВМ используется, в основном, для решения таких задач, как предоставление необходимых справочных данных, фиксация и оценка промежуточных и окончательных результатов. Следует отметить, что эти задачи применительно к проектированию маршевых ЖРД яв-

ляются весьма ответственными, трудоемкими и носят весьма не тривиальный характер. Так, представление необходимых справочных данных наиболее эффективно в виде баз данных, размещенных в PDM-системе. В этой же системе PDM необходимо представлять результаты структурного синтеза в виде фрагмента полного электронного описания проектируемого ЖРД), представленного на рисунке 1.7. В соответствии с рисунком 1.7 формируемый на этапе структурного синтеза фрагмент полного электронного описания проектируемого ЖРД включает электронную модель и электронную структуру, выполненные в соответствии с требованиями [26, 27, 28]. В соответствии с этими требованиями электронная модель проектируемого ЖРД должна включать электронную геометрическую модель и электронный макет изделия. В свою очередь, электронная геометрическая модель изделия должна включать электронные геометрические модели как сборочных единиц, так и всех деталей, входящих в эти сборочные единицы. Основным инструментом, с помощью которого формируются электронной модель и электронная структура проектируемого изделия, являются CAD-системы . Использование современных CAD - систем позволяет представить результаты структурного синтеза в виде CAD - моделей. Применительно к проектированию ЖРД количество CAD - моделей сборочных единиц может достигать нескольких сотен, а количество входящих в эти модели CAD - моделей деталей – может достигать десятков тысяч [5]. Если при этом учесть, что все эти модели должны быть взаимосвязаны, а в процессе создания этих моделей одновременно участвуют десятки либо сотни проектировщиков, то становится очевидной необходимость решения весьма сложной проблемы организации единого информационного пространства данных для создаваемого проекта ЖРД. Методика решения этой проблемы на основе использования PDM-технологии рассматривается в заключительном разделе данного учебного пособия.

3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖРД И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAE/CAD-ТЕХНОЛОГИИ

3.1 Постановка задачи параметрического синтеза

В разделе 2 отмечалось, что параметрический синтез заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных структуре и условиях работоспособности на выходные параметры проектируемого объекта, т.е. при параметрическом синтезе нужно найти точку или область в пространстве внутренних параметров, в которых выполняются те или иные условия (обычно условия работоспособности). Сами элементы и совокупность параметров, характеризующих эти элементы, определяются в процессе проведения процедуры структурного синтеза.

Придавая параметрам элементов структуры те или иные числовые значения, получаем один из возможных вариантов полученной структуры, или, другими словами, вариант проектного решения. Далее этот вариант проектного решения, представляющий собой множество конкретных значений числовых параметров элементов определенной структуры, будем обозначать как вектор **X** (вектор проектных параметров). Совокупность параметров на выходе будем обозначать как вектор **Y.**

В соответствии с рисунком 2.9 процедура параметрического синтеза включает в себя модификацию вектора **X**, анализ полученного модифицированного проектного решения и оценку результатов анализа. Обычно эта оценка заключается в проверке выполнения заданных в ТЗ условий работоспособности на выходные параметры **Y.**

Для маршевых ЖРД на компонентах керосин и жидкий кислород условия работоспособности могут включают в себя требования по топливной экономичности (удельному импульсу тяги в пустоте), тяге, расходу, запасу устойчивости, динамике регулирования и ряд других требований, оговоренных техническим заданием.

Если условия работоспособности выполняются в должной мере, то полученное проектное решение принимается, система (k+1)-го уровня описывается в принятой форме и формулируется ТЗ на проектирование элементов данного уровня (т.е. систем следующего уровня). Если же полученное проектное решение неудовлетворительно, выбирается один из возможных путей улучшения проектного решения - либо в рамках параметрического синтеза, либо в рамках структурного синтеза, либо корректировкой технического задания для рассматриваемого иерархического уровня.

Если модификации проектного решения X целенаправленны и подчинены стратегии поиска наилучшего значения некоторого показателя качества, то такая процедура параметрического синтеза называется процедурой параметрической оптимизации, или прости оптимизацией [7].

Базовая задача параметрической оптимизации ставится как задача математического программирования [7] :

$$\underset{x \in D_x}{\text{extr}}\ \mathbf{F(X)}, \qquad (3.1)$$

$$D_x = \{X \mid \varphi(X) > 0, \Psi(X) = 0\},$$

где F(X) — целевая функция; X — вектор управляемых (проектных) параметров; φ(X) и Ψ(X) — функции-ограничения; D_x — допустимая область в пространстве управляемых параметров. Запись (3.1) интерпретируется как задача поиска экстремума целевой функции путем варьирования управляемых параметров в пределах допустимой области.

Таким образом, для выполнения расчета номинальных значений параметров необходимо, во-первых, сформулировать задачу в виде (3.1), во-вторых, решить поиска экстремума функции F(X). Сложность постановки оптимизационных проектных задач обусловлена наличием у проектируемых объектов нескольких выходных параметров, которые могут быть критериями оптимальности, но в задаче (3.1) целевая функция должна быть одна. Другими словами,

проектные задачи являются многокритериальными, и возникает проблема сведения многокритериальной задачи к однокритериальной.

Применяют несколько способов выбора критерия оптимальности.

В *частном критерии* среди выходных параметров один выбирают в качестве целевой функции, а условия работоспособности остальных выходных параметров относят к ограничениям задачи (3.1). Эта постановка вполне приемлема, если действительно можно выделить один наиболее критичный выходной параметр. Но в большинстве случаев сказывается ограниченность такого подхода.

Аддитивный критерий объединяет (свертывает) все выходные параметры (частные критерии) в одну целевую функцию, представляющую собой взвешенную сумму частных критериев

$$F(X) = \sum_{j=1}^{m} \omega_j \cdot y_j(X) \qquad (3.2)$$

где ω_j — весовой коэффициент; m — число выходных параметров. Функция (3.2) подлежит минимизации, при этом, если условие работоспособности имеет вид $y_j > \mathrm{T_j}$, $\omega_j < 0$.

Недостатки аддитивного критерия — субъективный подход к выбору весовых коэффициентов и не учет требований ТЗ.

Аналогичные недостатки присущи и мультипликативному *критерию,* целевая функция которого имеет вид

$$F(X) = \prod_{j=1}^{m} y_j^{\omega_j}(X) \qquad (3.3)$$

Нетрудно видеть, что если прологарифмировать (3.3), то мультипликативный критерий превращается в аддитивный.

Более предпочтительным является *максиминный критерий,* в качестве целевой функции которого принимают выходной параметр, наиболее неблагополучный с позиций выполнения условий работоспособности. Для оценки степени

выполнения условия работоспособности j-го выходного параметра вводят *запас работоспособности* этого параметра S_j и этот запас можно рассматривать как нормированный j-й выходной параметр. Например (здесь и далее для лаконичности изложения предполагается, что все выходные параметры приведены к виду, при котором условия работоспособности становятся неравенствами в форме $y_j > \mathrm{T_j}$):

$$S_j = (T_j - y_j)/\mathrm{T_j} ,$$

или

$$S_j = (T_j - y_{\mathrm{ном\,j}})/\delta_j ,$$

где $y_{ном\,j}$ - номинальное значение, а δ_j — некоторая характеристика рассеяния j-го выходного параметра, например, допуск $\Delta = 3\sigma$. Тогда целевая функция в максиминном критерии есть

$$F(X) = \min S_j(X)$$
$$j \in [1:m]$$

Здесь запись [1:m] означает множество целых чисел в диапазоне от 1 до *m*. Задача (3.1) при максиминном критерии конкретизируется следующим образом:

$$F(X) = \max \min S_j(X) \qquad (3.4)$$
$$X \in D_x \; j \in [1:m]$$

где допустимая область D_x определяется только прямыми ограничениями на управляемые параметры x_i :

$$x_{i\min} < x_i < \mathrm{x_{i\,max}} .$$

3.2 Математическое и информационное обеспечение задач параметрического синтеза

В задачах параметрического синтеза необходимо использовать значительное количество различных типов математических моделей в соответствии с различными стадиями проектирования и блочно-иерархической декомпозицией ЖРД на топливе кислород-керосин, приведенной на рисунке 2.7.

Используемые математические модели должны отвечать требования адекватности, универсальности и экономичности.

На начальных стадиях проектирования (этап НИР), связанных с выбором основных тактико - технических требований к проектируемому ЖРД (стадии предпроектных исследований и разработка технических предложений), в основном используют математические модели исследования операций [10] для объектов проектирования на верхних иерархических уровнях блочно-иерархической декомпозиции ЖРД (рисунок 2.7).

На стадии эскизного и рабочего проектирования (этап ОКР) основным видом математических моделей являются физико-математические модели рабочих процессов в основных агрегатах и узлах ЖРД, такие как модели рабочих процессов в камере сгорания и газогенераторе, сопле, турбине и насосах ТНА и т.д. [8,9, 40,41]. На этих стадиях основной процедурой параметрического синтеза является многовариантный анализ в целях выбора наилучших параметров структурных элементов. На завершающем этапе рабочего проектирования основной процедурой параметрического синтеза становится одновариантный анализ для проверки выполнения условий работоспособности окончательных вариантов проектирования деталей и сборочных единиц. К физико-математическим моделям на этапах эскизного и рабочего проектирования предъявляются наиболее высокие требования к их адекватности. Так например, величина погрешности расчетной оценки идеальной величины удельного импульса и потерь удельного импульса из-за трения, рассеяния и химической неравновесности не должна превышать величину порядка 0.1 %..

В целом наибольший объем процедур параметрического анализа приходится на стадии эскизного и технического проектирования в рамках многовариантного анализа. Рисунок 2.9 позволяет установить характерную особенность взаимосвязи проектных процедур анализа и синтеза. Эта взаимосвязь имеет характер вложенности процедуры анализа в процедуру оптимизации (параметрического синтеза) и процедуры оптимизации в процедуру синтеза, объединяющую синтез структурный и параметрический [6].

Более детально вложенность этих процедур показана на рисунке 3.1 . Вложенность означает, во-первых, что анализ входит как составная часть в оптимизацию, а оптимизация – в синтез, во- вторых, что однократное выполнение процедуры оптимизации требует многократного выполнения процедуры анализа, а однократное решение задачи синтеза – многократного решения задачи оптимизации. Очевидно, что такой же характер взаимодействия имеют процедуры анализа – однократный многовариантный анализ основан на многократном одновариантном анализе. Оценка показывает, что синтез проектного решения на очередном этапе проектирования может потребовать выполнения весьма большего количества вариантов анализа. Если ввести коэффициент f_{ij} , равный количеству выполнения процедуры i , вложенной в процедуру j , при однократном выполнении процедуры j, а процедурам синтеза, оптимизации, многовариантного и одновариантного анализа присвоить номера соответственно 1, 2, 3, 4, то

Рисунок 3.1 – Вложенный характер типовых проектных процедур анализа и синтеза

$$f_{41} = f_{21} \cdot f_{32} \cdot f_{43} \cdot \quad (3.5)$$

Рассмотрим упрощенный пример структурно-параметрического синтеза такого технического объекта, как камера маршевого ЖРД. Пусть при синтезе просматривается f_{21} вариантов его структуры, каждый вариант структуры оптимизируется с выполнением f_{32} шагов оптимизации, а каждый шаг оптимизации заключается в оценке объекта, требующей f_{43} вариантов анализа. Оценка количество вариантов структурного синтеза камеры показывает, что количество различных структурных параметров, характеризующих смесительную головку, цилиндрическую часть камеры сгорания и сопло, не менее 20 (без учета конструктивных параметров, характеризующих рубашку охлаждения и подводящие трубопроводы). Принимая для простоты, что каж-

дый из структурных параметров принимает лишь два значения, приходим к следующей оценке коэффициента f_{21}: $f_{21} = 2^{20} \approx 10^6$. Примем далее, что $f_{32}=f_{43}=10$.

Тогда количество вариантов расчета при структурно-параметрическом синтезе будет равно: $f_{41} \approx 10^6 \cdot 10 \cdot 10 = 10^8$. Естественно, что задача с таким количеством вариантов расчета оказывается даже при использовании современных ЭВМ.

Приведенный выше пример свидетельствует о большей трудоемкости проектирования ЖРД и о необходимости поиска путей сокращения этой трудоемкости. Разработка способов сокращения затрат вычислительных ресурсов на выполнение проектных процедур – одна из актуальная проблем автоматизированного проектирования.

Один из путей решения этой проблемы – применение достаточно точных, сложных и трудоемких математических моделей и алгоритмов анализа только на завершающих итерациях синтеза, т.е при поверочных расчетах на стадии рабочего [6]. Для большинства просматриваемых вариантов структуры при этом выполняется лишь ориентировочная оценка на основе косвенных критериев, упрощенных моделей и алгоритмов. Такая оценка позволит без существенных затрат вычислительных ресурсов отсеять большинство неперспективных вариантов и оставить для тщательного анализа малое число вариантов.

Существенное сокращение трудоемкости процедур параметрического синтеза можно обеспечить за счет использования блочно-иерархической декомпозиции применительно к рабочему процессу проектируемых ЖРД на компонентах кислород-керосин. В результате такой декомпозиции общая модель рабочего процесса этого ЖРД разбивается на совокупность взаимосвязанных рабочих процессов в системах хранения и подачи компонентов, камере и агрегатах автоматики. В свою очередь, модель рабочих процессов в камере разбивается на совокупность взаимосвязанных рабочих процессов в смесительной головке, камере сгорания, сопле и рубашке охлаждения . Взаимосвязь рабочих процессов при этом обеспечивается тем, что результаты расчетов для одной

группы рабочих процессов являются исходными данными другой группы рабочих процессов. При этом следует иметь в виду, что, кроме внутренних взаимосвязей процедур параметрического синтеза, необходимо обеспечить взаимосвязь этих процедур с процедурами структурного синтеза. Эффективное обеспечение перечисленных выше взаимосвязей можно обеспечить, лишь используя концепцию полного электронного описания изделия (рисунок 1.7). В соответствии с этой концепцией внутренняя взаимосвязь процедур параметрического синтеза обеспечивается за счет использования PDM-технологии и представления на этой основе результатов параметрического синтеза в виде CAE/PDM-модели. Эта же PDM-технология используется для обеспечения взаимосвязи между процедурами параметрического синтеза и структурного синтеза, результатом чего является формирование проектного облика ЖРД в виде CAE/CAD/PDM – модели.

Совокупность изложенных выше принципов составляет содержание концепции автоматизированного ЖРД с использованием CAE/CAD-технологии. Ниже излагается реализация этой концепции применительно к сопряженной задаче нестационарного прогрева «горячей» стенки камеры ЖРД на компонентах кислород-керосин.

Поставленная задача решается в двух вариантах:

1. Разработка CAE - технологии моделирования внутрикамерных рабочих процессов маршевых ЖРД на основе использованием коммерческого программного комплекса Ansys CFX, реализацией CFD-технологию (технологию компьютерной газовой динамики).

2. Сочетание CAE-технологии моделирования внутрикамерных рабочих процессов маршевых ЖРД на основе использованием коммерческого программного комплекса Ansys CFX с имеющимся научно-техническим заделом НИЦ КЭ СГАУ в области моделирования внутрикамерных рабочих процессов ракетных двигателей.

Ниже излагаются результаты решения этой задачи.

3.3 Технология и результаты CAE- моделирования внутрикамерных рабочих процессов ЖРД с использованием программного комплекса Ansys CFX

Анализ литературных источников показывает, что примеры успешного использования программного комплекса Ansys CFX для моделирования рабочих процессов в камере маршевых ЖРД с приемлемым для практики уровнем адекватности отсутствуют. Тем не менее, имеются две работы [45,46], имеющие непосредственное отношение к ЖРД. Первая из этих работ [45] относится к моделированию газодинамических процессов в одноступенчатой турбине ТНА маршевых ЖРД на топливе кислород-керосин. Во второй работе [46] рассматриваются газодинамические аспекты течения рабочего тела в соплах ЖРД без учета изменения состава продуктов сгорания. Полезные результаты содержатся также в работах [47, 48, 49, 50, 51], в которых излагаются результаты использования Ansys CFX применительно к моделированию рабочих процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей [47,48] и топках различных энергетических установок [49,50], а также опыт проектирования систем распыла для различных приложений [51].

В соответствии с CFD-технологией процесс численного расчета состоит из пяти основных этапов, содержание каждого из которых применительно к рассматриваемой задаче изложено ниже. При этом в качестве примера, на котором излагается разработанная технология, выбран маршевый ЖРД НК-33 на компонентах топлива жидкий кислород и керосин.

3.3.1 Создание расчетной CFD-модели сегмента камеры ЖРД и геометрической CAD-модели сегмента камеры ЖРД

В рассматриваемой задаче расчетная область – это внутренний объем сегмента камеры маршевого ЖРД НК-33. В Ansys CFX реализована методика расчета только трехмерных расчетных зон, в отличие, например, от Ansys Fluent , где имеется возможность расчета и двухмерных расчетных зон.

Создание расчетной модели начинается с формирования геометрической модели (CAD-модели). Эту геометрическую модель можно сформировать в любой CAD - системе (Компас, UG, Design Modeler и т.д.), а затем импортировать в Ansys CFX. На рисунках 3.2 и 3.3 представлена геометрическая CAD-модель сегмента камеры ЖРД на базе НК-33, созданная в CAD-системе Компас и импортированной в среду Ansys CFX. Отметим, что формирование геометрической модели фактически представляет собой процедуру структурного синтеза, основным результатом которой является получение теоретического контура камеры ЖРД. В свою очередь, этот теоретический контур получен с использованием процедуры параметрического синтеза на основе использования термодинамической модели, реализованной в виде программного модуля S [52].

На базе геометрической модели создаются сеточная модель и модель граничных условий расчетной области. В процессе создание сеточной модели расчетной зоны происходит разбиение твердотельной геометрической 3D-модели на ячейки. Производится это процедура в специальных полуавтоматических системах – сеткогенераторах. Результаты формирования сеточной модели расчетной зоны для сегмента камеры ЖРД приведены на рисунках 3.4 и 3.5.

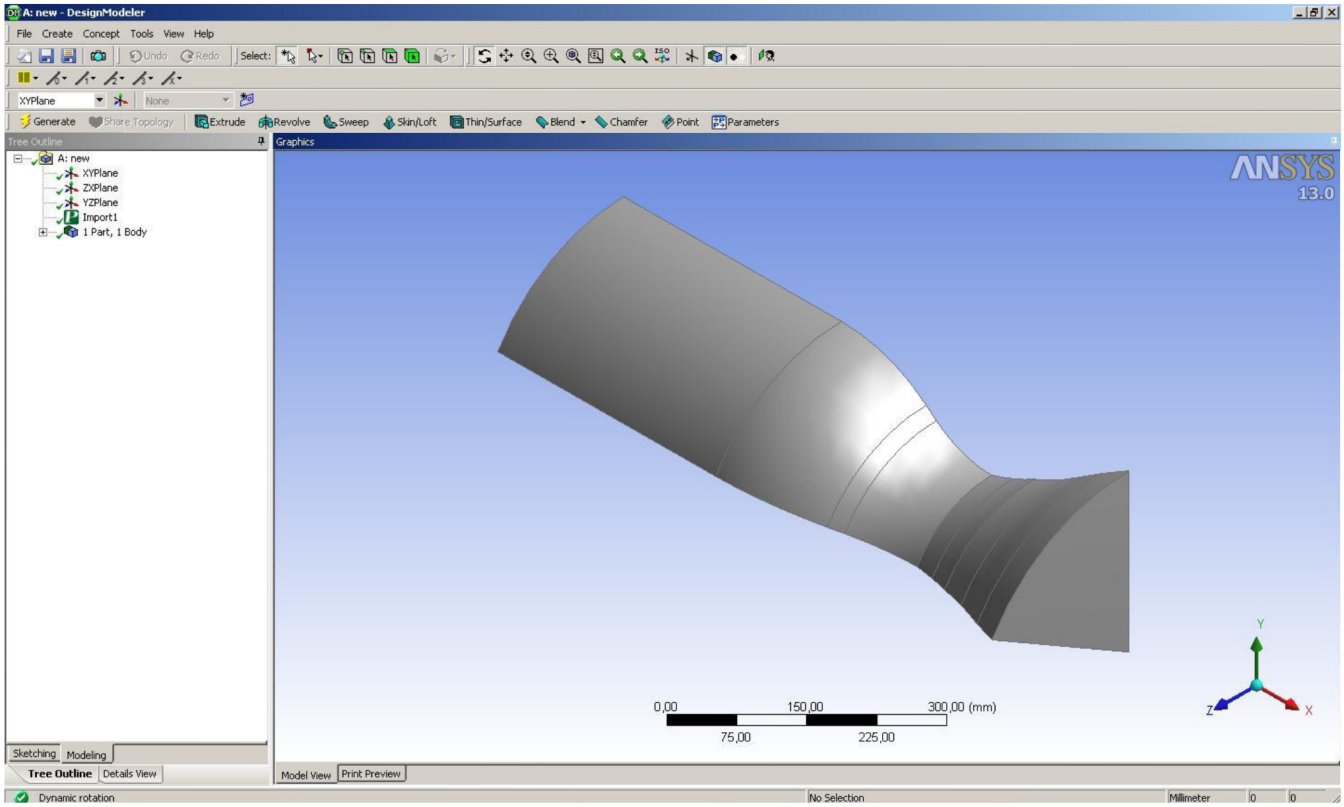

Рисунок 3.2 -Геометрическая я модель сегмента камеры ЖРД на базе НК-33, импортированная в среду Ansys CFX (вид от среза сопла)

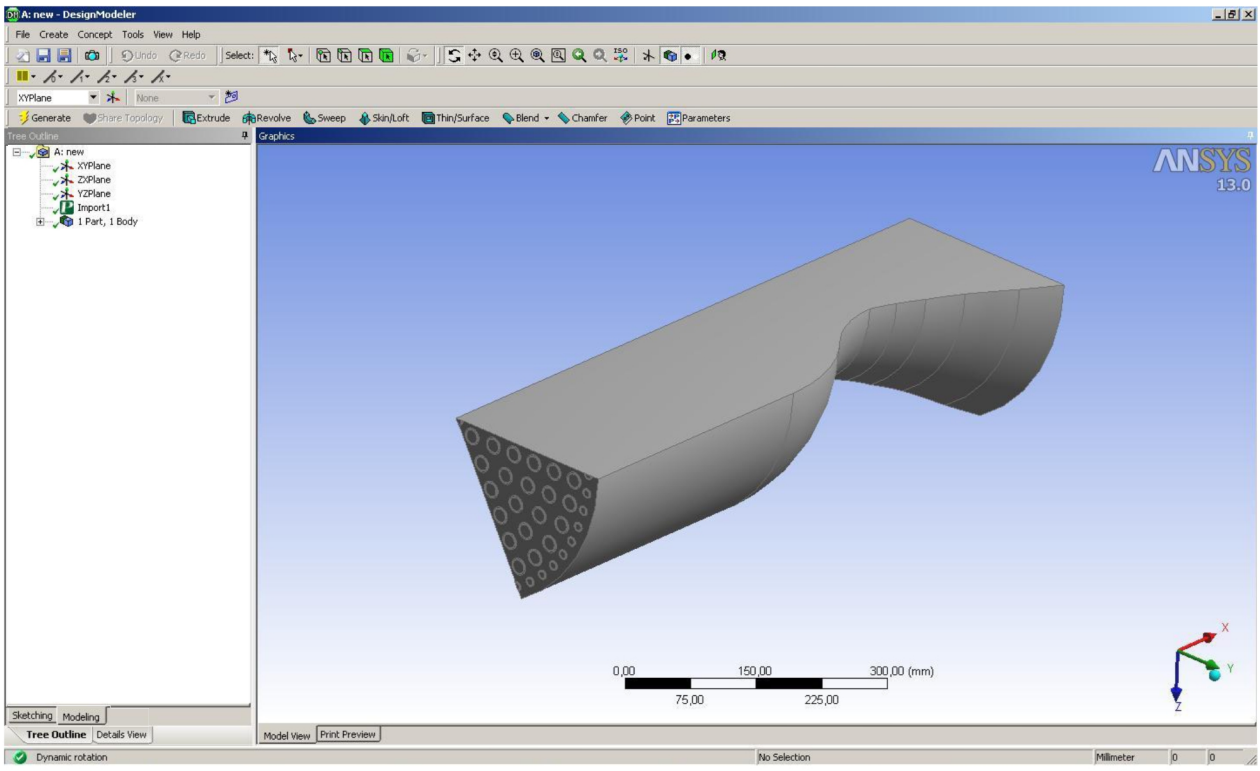

Рисунок 3.3 - Геометрическая модель сегмента камеры ЖРД на базе НК-33 импортированная в среду Ansys CFX (вид со стороны смесительной головки)

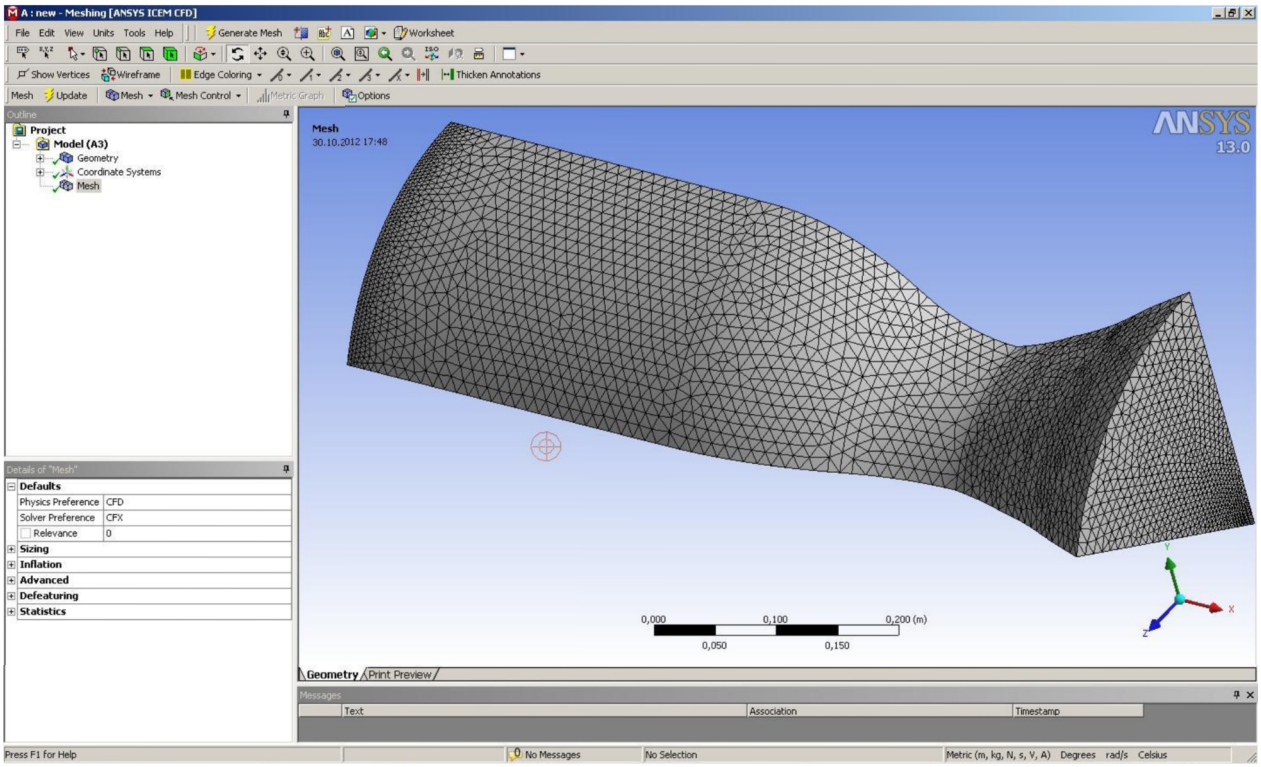

Рисунок 3.4 – Сеточная модель сегмента камеры ЖРД на базе НК-33, импортированная в среду Ansys CFX (вид со стороны сопла)

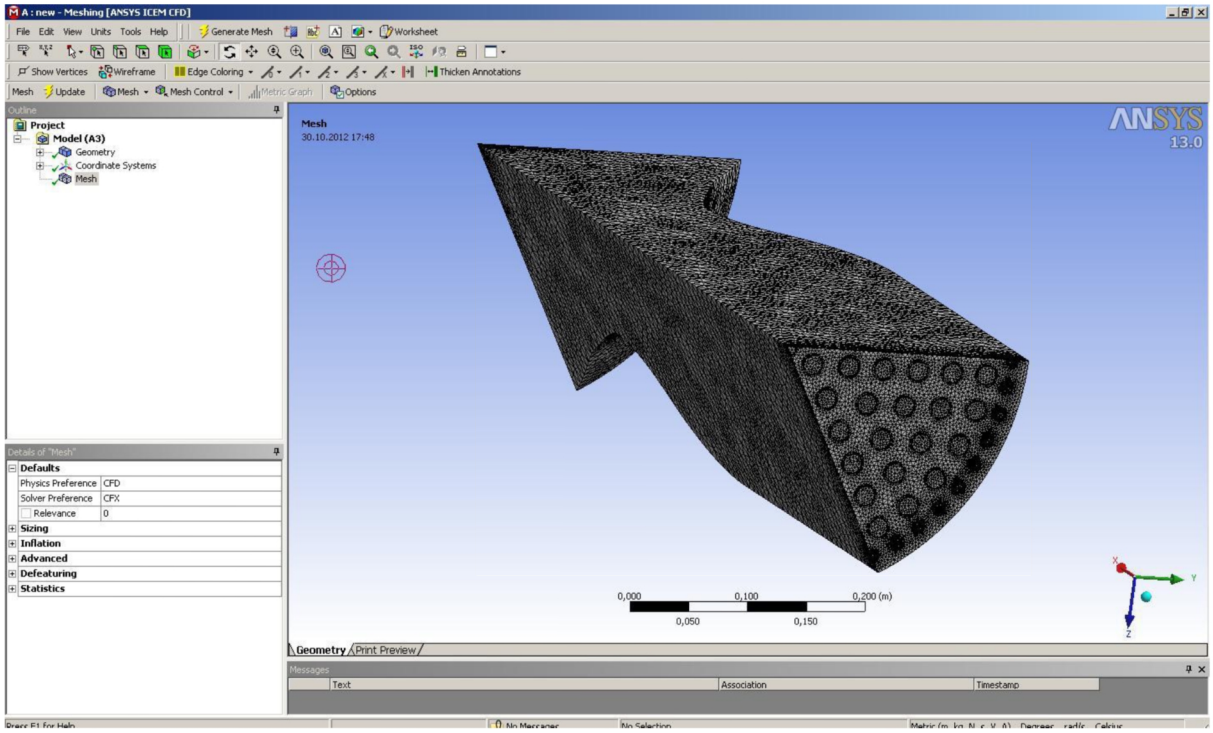

Рисунок 3.5 - Сеточная модель сегмента камеры ЖРД на базе НК-33, импортированная в среду Ansys CFX (вид со стороны смесительной головки)

Чтобы задача была определена, необходимо на сеточную модель наложить граничные условия – условия на граничные элементы, характеристики по-

токов в которых известно. Для нестационарных задач кроме граничных условий требуется ещё и задание начальных параметров в каждой ячейки внутри расчетной области. Это так называемые начальные условия. Пример модели граничных условий для сегмента камеры ЖРД приведен на рисунках 3.6 и 3.7 .

Совокупность физико-математической модели на основе уравнений Навье-Стокса, сеточной модели и модели граничных условий представляет собой расчетную модель внутрикамерных процессов ЖРД на базе НК-33, реализованную средствами Ansys CFX.

Завершающими этапами моделирования на основе технологии CFD являются процесс нахождения решения созданной расчетной модели, а также графическое представление и анализ результатов численного расчета.

Процесс нахождения решения созданной расчетной модели заключается в отыскании таких значений параметров в каждой расчетной ячейке, чтобы во всех точках расчетной зоны выполнялись условия сохранения различных параметров заданных уравнениями модели. В начальный момент решения эти условия, как правило, не выполняются, потому правильное решение находится в результате проведения большого количества итерационных процедур, при этом необходимо обеспечить устойчивость и сходимость процесса численного решения. Для наглядного представления и анализа результаты численного решения представляются в графической форме в виде графиков, цветных полей распределения переменных или векторных полей, линий тока, числовых значений параметров в заданных областях. Форма графического представления результатов численного решения должна наилучшим образом отражать физическую сущность моделируемых внутрикамерных процессов ЖРД.

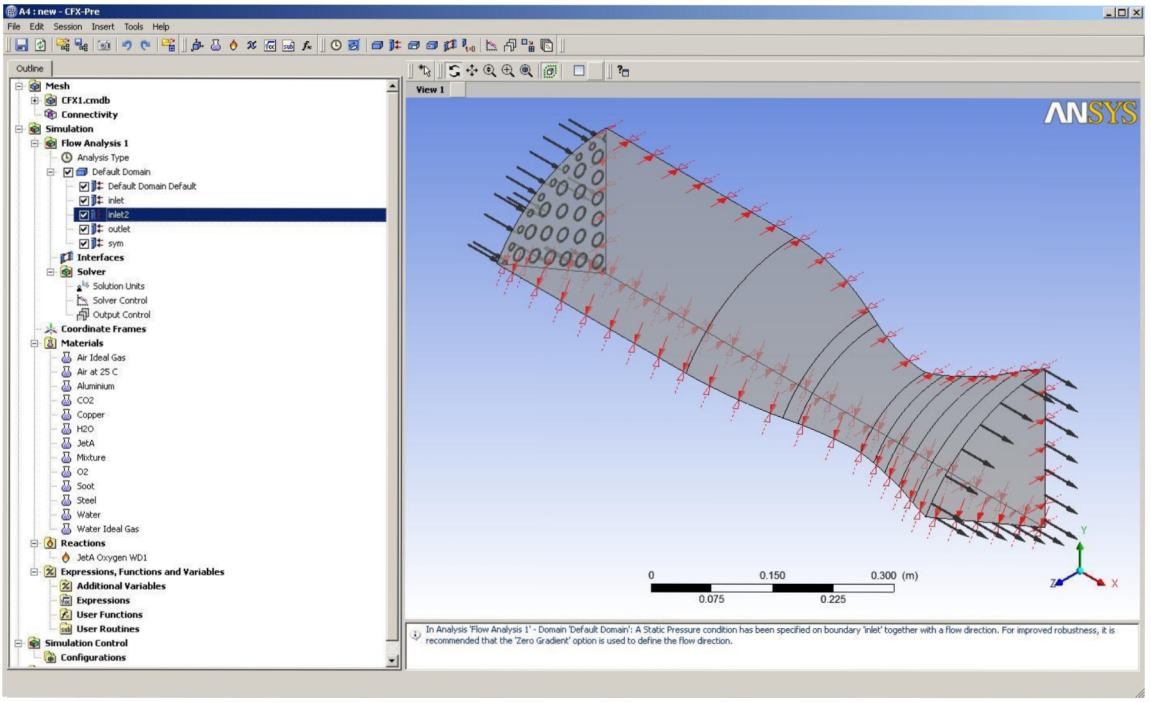

Рисунок 3.6 – Модель граничных условий сегмента камеры ЖРД на базе НК-33 , импортированная в среду Ansys CFX (вид со стороны сопла)

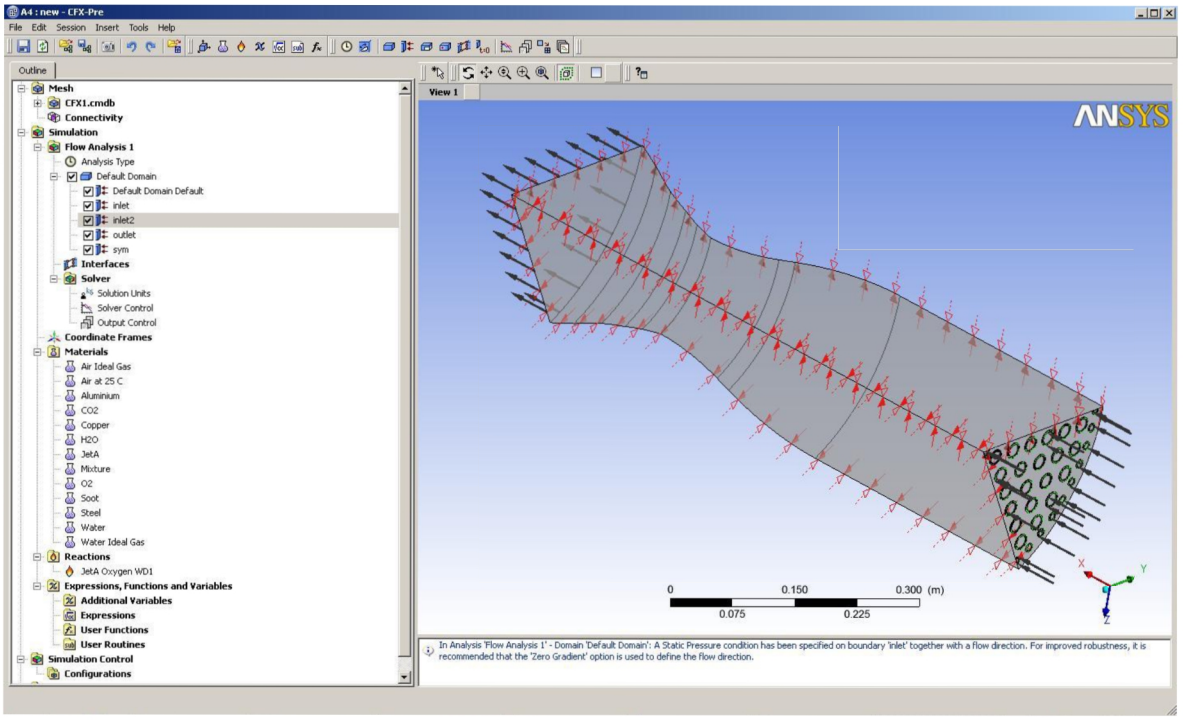

Рисунок 3.7 - Модель граничных условий сегмента камеры ЖРД на базе НК-33, импортированная в среду Ansys CFX (вид со стороны смесительной головки)

3.3.2 Результаты расчета с использованием CAE - модели сегмента камеры ЖРД в среде Ansys CFX

Анализ показывает, что полная реализация возможностей Ansys CFX для моделирования рабочих процессов в камере сгорания и сопле ЖРД связана с использованием наиболее общей системы уравнений, включающей:

- уравнения, описывающих процесс распыла и испарения капель для компонента топлива, подаваемого в жидкой фазе;

- уравнения переноса (диффузии) для каждой составляющей продуктов сгорания;

уравнения химической кинетики для каждой газообразной составляющей продуктов сгорания, описывающие изменение массовой доли этой составляющей во всем объеме камеры сгорания и сопла.

При этом возникает ряд проблем, основными из которых являются проблема задания требуемых исходных данных в виде начальных и граничных условий и проблема больших затрат времени на проведение расчета. Поэтому на данном этапе расчет разбивался на два этапа.

Первый этап расчета с использованием CAE- модели сегмента камеры ЖРД в среде Ansys CFX связан с оценки адекватности этой модели применительно к определению таких термодинамических свойств продуктов сгорания, как температура торможения и химический состав. Оценка адекватности проводилась сравнением результатов расчета по CAE- модели в среде Ansys CFX с результатами расчета на основе использования термодинамического модуля S, описание которого приводится в [52].

Расчет термодинамических свойств продуктов сгорания с использованием CAE- модели в среде Ansys CFX начинался с задания исходных данных с помощью интерфейса, показанного на рисунках 3.8 … 3.11.

Результаты расчета температуры и химического состава с использованием CAE - модели в среде Ansys CFX и программного модуля S приведены в таблице 3.1.

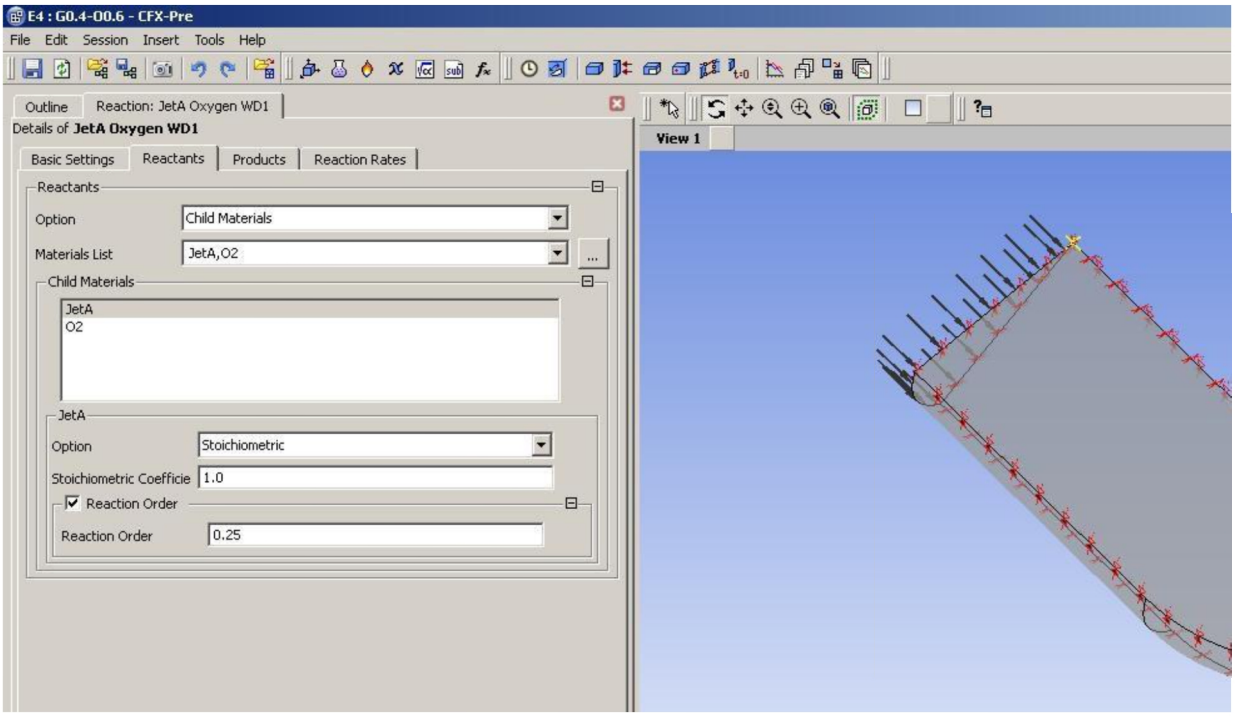

Рисунок 3.8 - Описание левой части уравнений изменения химического состава рабочего тела

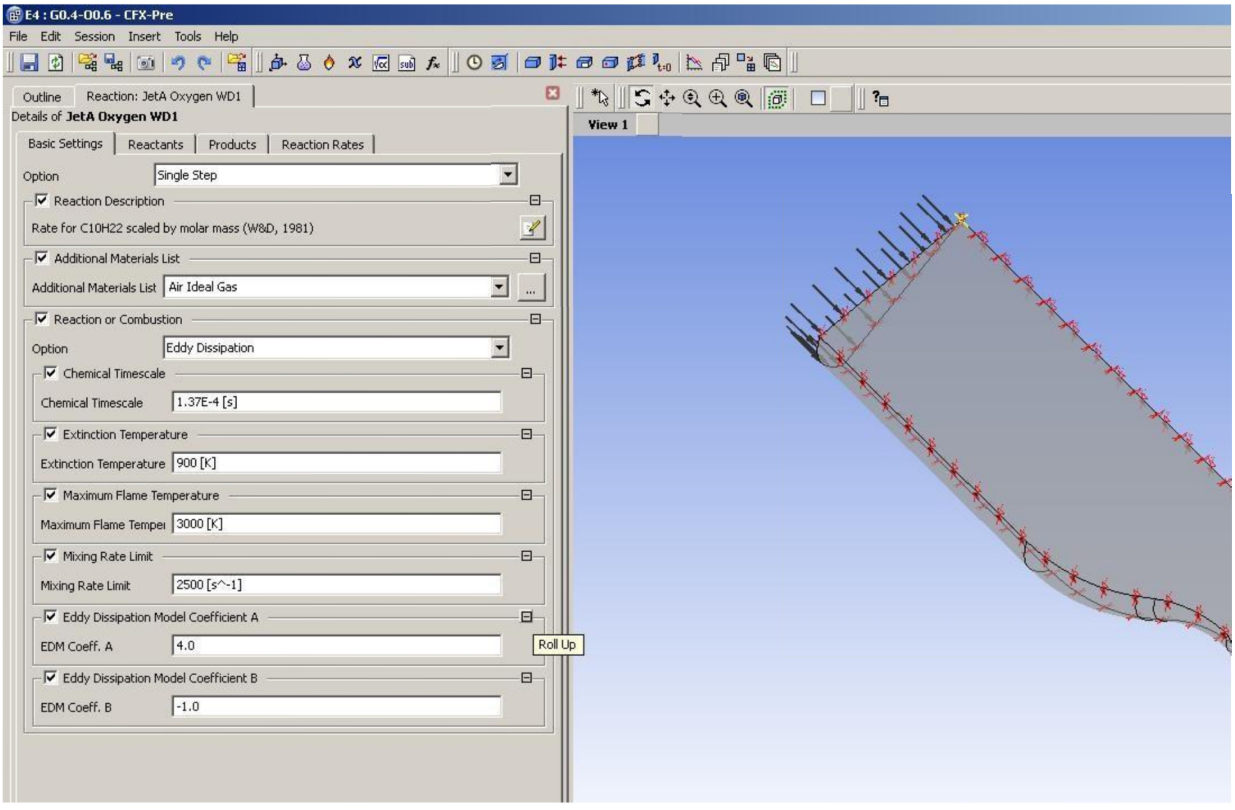

Рисунок 3.9 – Информация об основных параметрах протекающих химических реакций

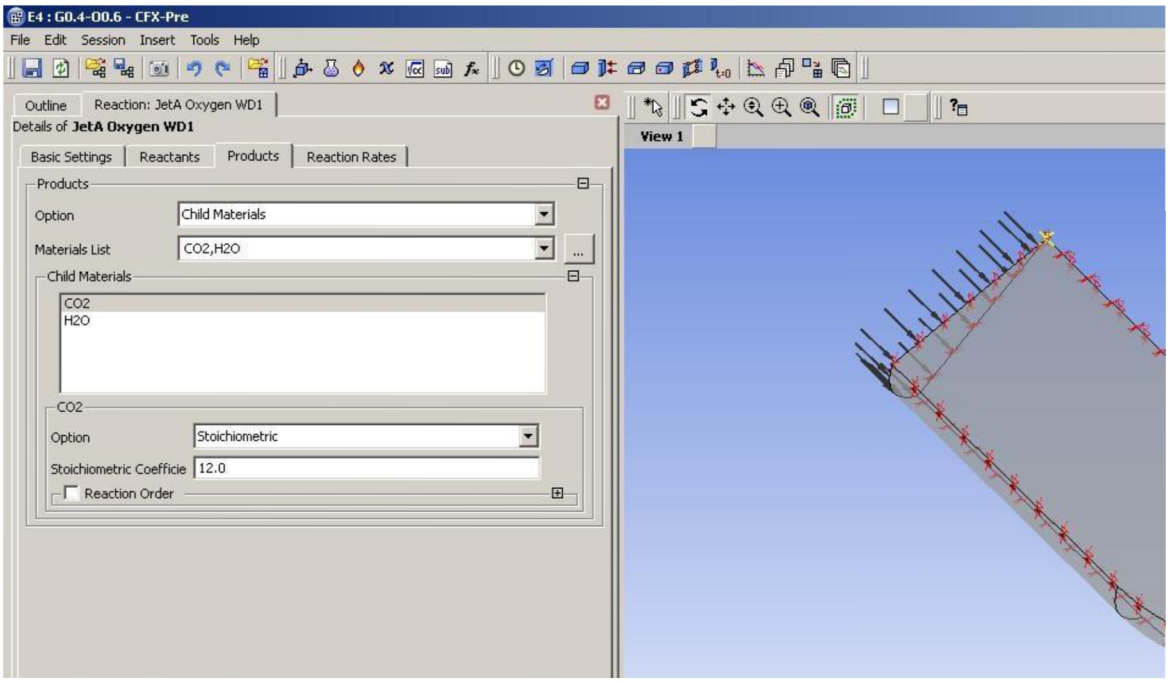

Рисунок 3.10 – Описание правой части уравнений изменения химического состава рабочего тела

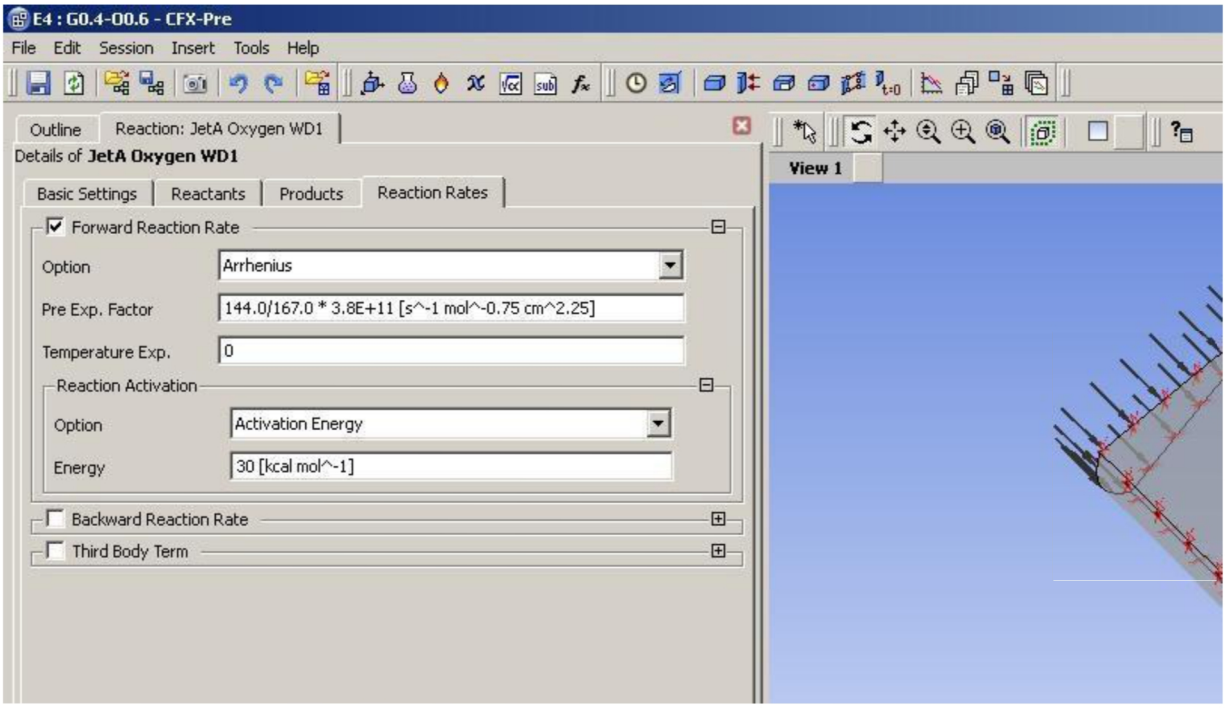

Рисунок 3.11 – Информация о константах скоростей прямых и обратных реакций

Таблица 3.1 – Сравнение результатов расчета температуры торможения и химического состава продуктов сгорания на входе в сопло (p_{oc} = 14 МПа , топливо керосин и жидкий кислород, $\alpha_{ок} = 0.50$)

Название параметра	Размерность	Результаты расчета в модуле S	Результаты расчета в Ansys CFX	Результаты фундаментального справочника [44]
Температура торможения на входе в сопле, T_{oc}	К	2896	2912	2895
H_2	массовая доля	0.288	0.224	0.288
H_2O	массовая доля	0.200	0.221	0.201
CO	массовая доля	0.460	0.55	0.460
CO_2	массовая доля	0.044		0.044
Сумма		0.992	0.995	1.00

Сравнение результатов расчета в Ansys CFX и с использованием программного модуля S, приведенные в таблице 3.1 показывают их удовлетворительное согласование лишь по температуре (расхождение не превышает 0.5 %). В то же время величина различие по химическому составу составляет от 10 % для массовой доли H_2O до 30 % по массовой доле H_2. Для выяснения источника этого расхождения были использованы результаты расчетов, приведенные в фундаментальном справочнике по термодинамическим и теплофизическим свойствам продуктов сгорания [55], которые приведены в таблице 3.1. Сравнение с результатами этого справочника показывает их практически полное совпадение с результата расчета с использованием программного комплекса S. Таким образом, источником различия в результатах расчета является Ansys CFX. Анализ показывает, что основная причина отличия связана, вероятнее всего, с различием свойств авиационного керосина (именно его свойства заложены в базу данных Ansys CFX) и керосина, применяемого в качестве ракетного топлива.

Второй этап проведения расчетов был связан с изучением возможностей использования Ansys CFX для получения физической картины формирования по-

ля скоростей в камере сгорания ЖРД НК - 33 с многофорсуночной головкой. Для этого использовалась модель расчетной области, описание которой изложено в разделе 3.3.1. На рисунках 3.12 … 3.19 приведены результаты расчета в Ansys CFX, связанные с физической картиной формирования полей скоростей, концентраций и чисел Маха рабочего тела в сегменте многофорсуночной камеры сгорания и сопла ЖРД НК - 33, начиная от плоскости форсуночной головки и кончая течением в сверхзвуковой части сопла.

Результаты, приведенные на рисунках 3.12 … 3.15, показывают процесс формирования поля скоростей в камере сгорания. Анализ этих результатов показывает, что в камере сгорания можно выделить три характерных области:

1) область вблизи плоскости форсуночной головки, для которой характерна развитая область обратных токов, при этом характерный размер этой области в осевом направлении имеет тот же порядок, что и поперечный размер форсунки (рисунки 3.12 и 3.13);

2) область, в которой отсутствуют обратные токи, но величина поперечной скорости имеет такой же порядок, как и величина продольной скорости; характерный размер этой области в осевом направлении составляет несколько поперечных размеров форсунки (рисунок 3.14)

3) область, для которой характерно осевое движение продуктов сгорания; размер этой области в продольном направлении составляет от 2/3 до 3/5 длины камеры сгорания (рисунок 3.15)

Результаты, приведенные на рисунках 3.16 и 3.17, показывают возможности Ansys CFX для расчета чисел Маха в сопле ЖРД. Результаты, приведенные на рисунке 3.17, показывают, что проведенный в Ansys CFX расчет хорошо передает физическую особенность поля чисел Маха в трансзвуковой части сопел маршевых ЖРД с радиусной сверхзвуковой частью. Эта особенность связана с криволинейным характером поверхности перехода через скорость звука, что влечет за собой существенно двухмерный характер поля чисел Маха в трансзвуковой части сопла.

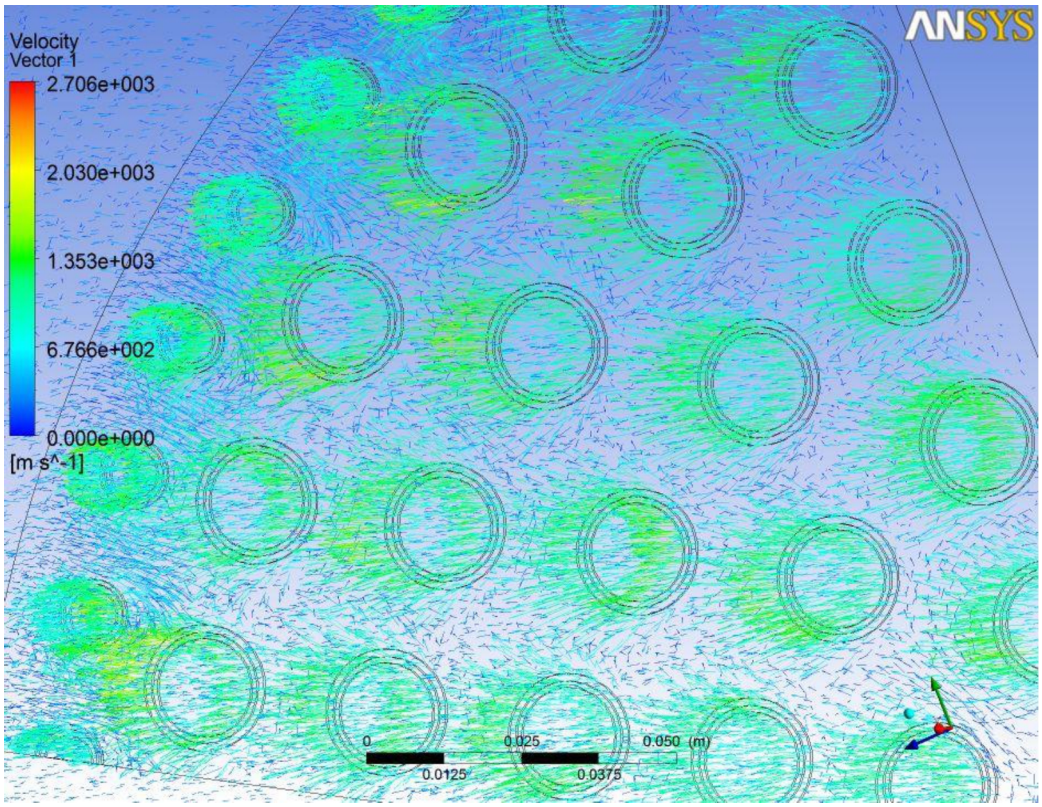

Рисунок 3.12 – Поле векторов скорости в пристенной области форсунок сегмента камеры ЖРД НК-33

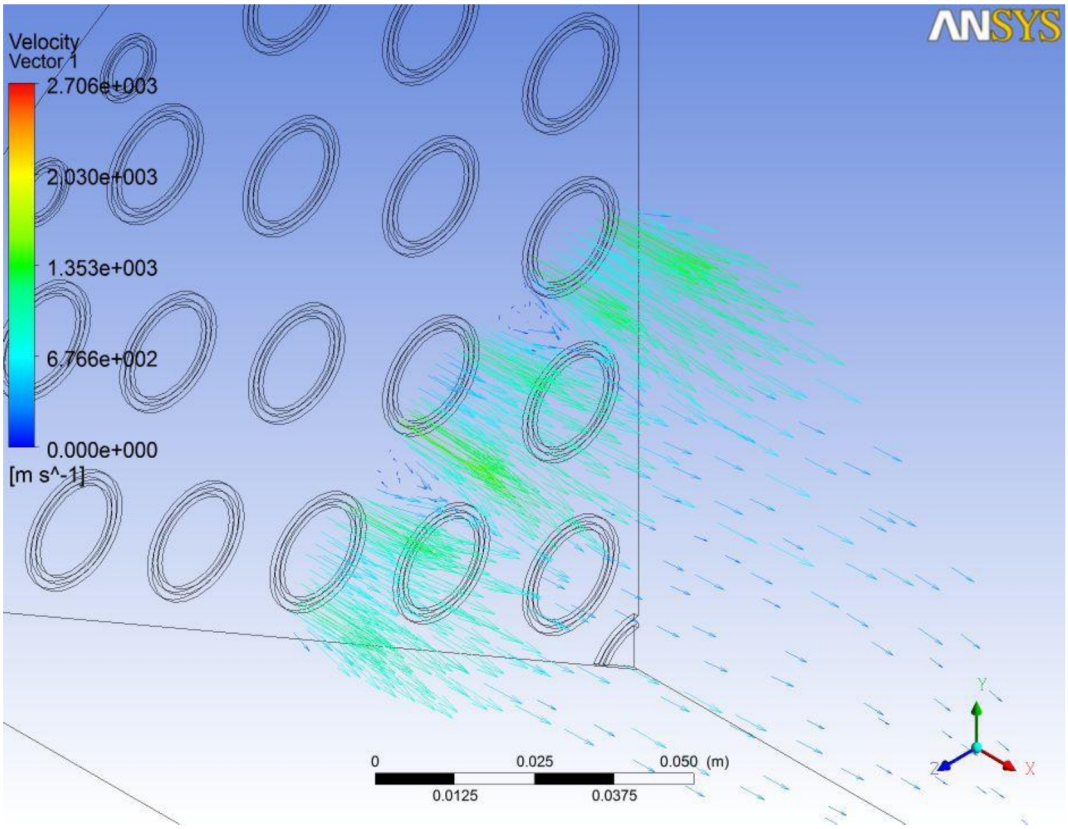

Рисунок 3.13- Поле векторов течения продуктов сгорания в приосевой области форсунок сегмента камеры ЖРД НК-33

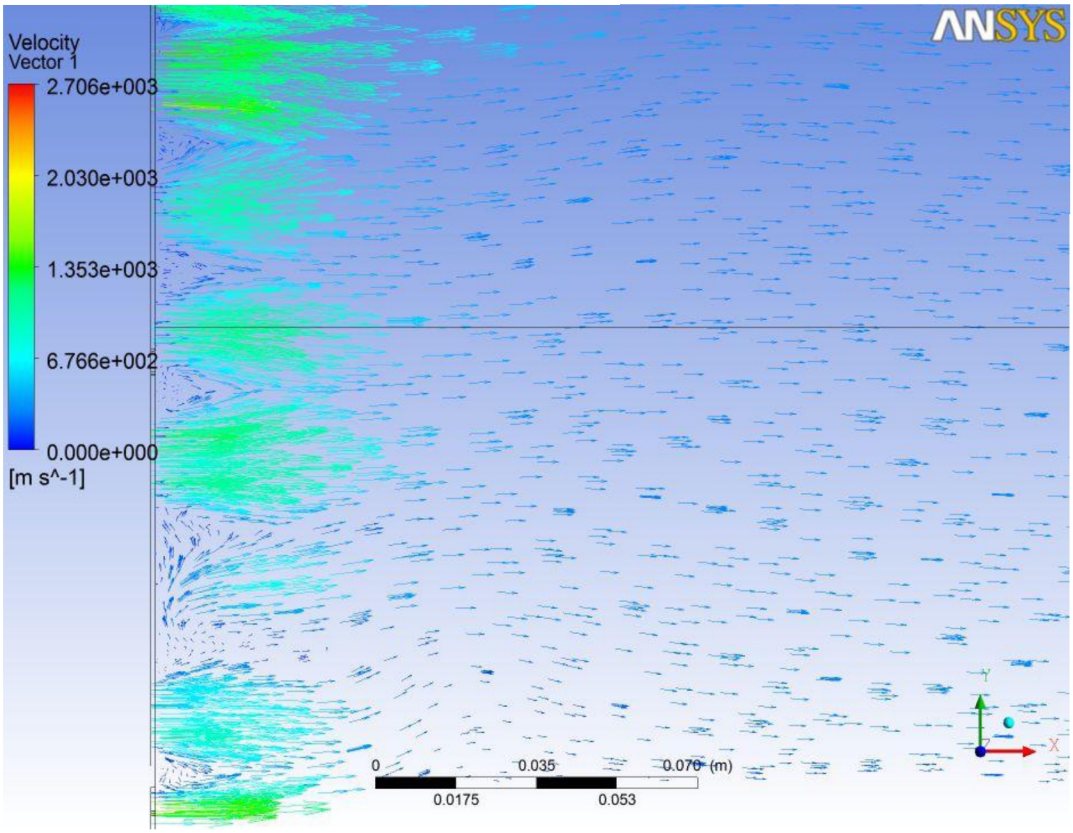

Рисунок 3.14 - Поле векторов скорости в зоне обратных токов (меридиональная плоскость) сегмента камеры ЖРД НК-33

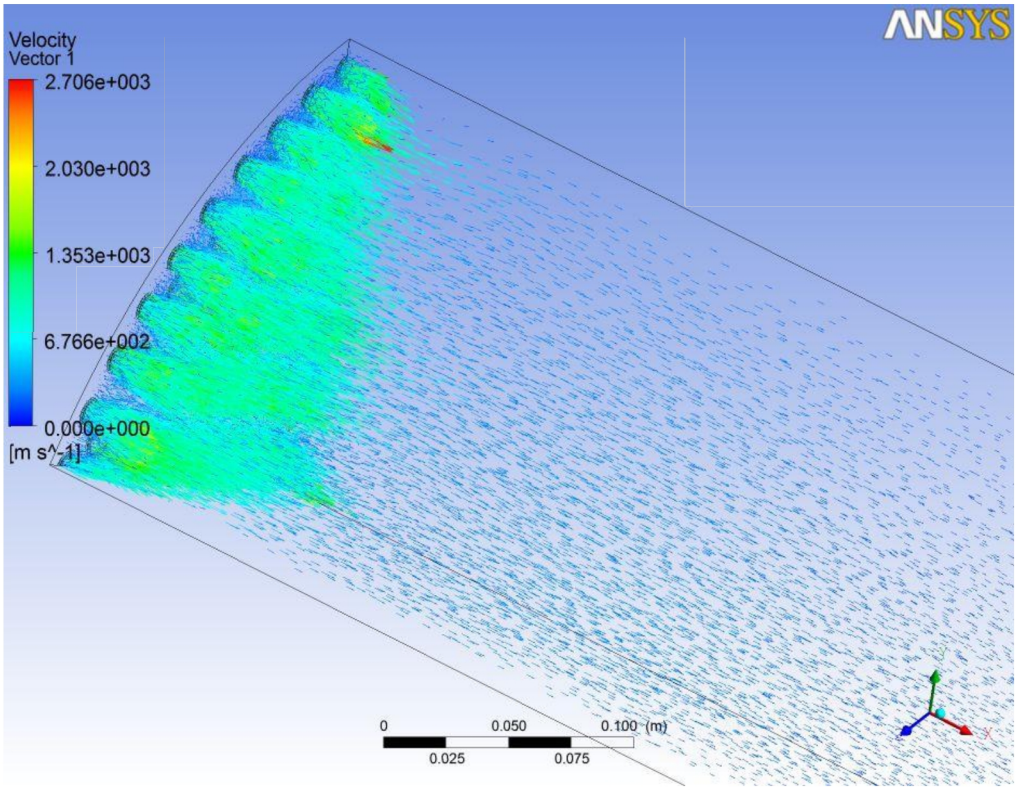

Рисунок 3.15 – Поле векторов скорости в многофорсуночном сегменте камеры ЖРД НК - 33 (меридиональная плоскость)

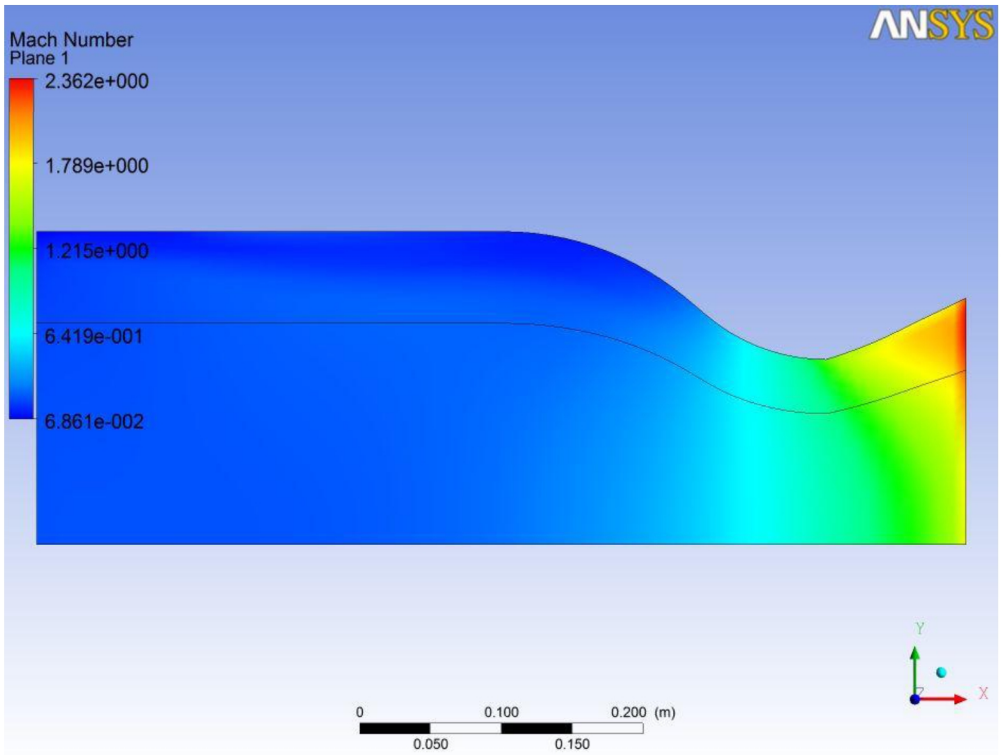

Рисунок 3.16 – Поле чисел Маха в камере ЖРД НК-33 в меридиональной плоскости

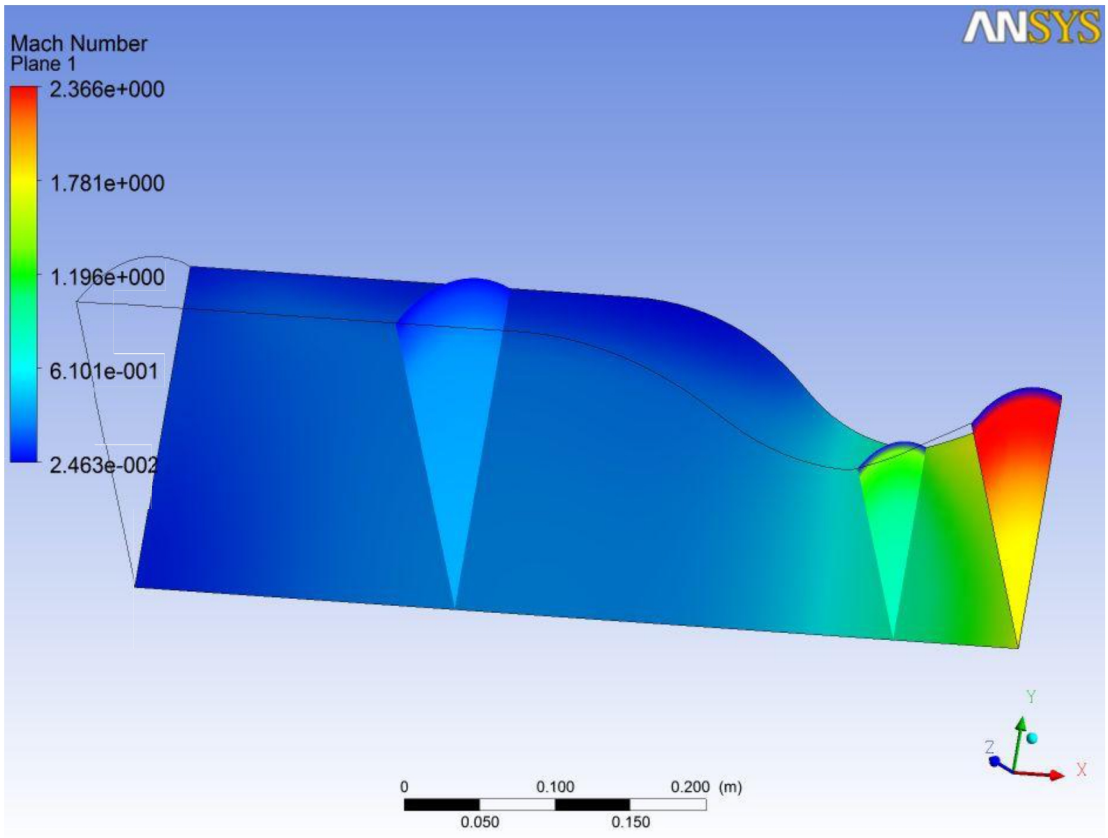

Рисунок 3.17 - Поле чисел Маха в сегменте камеры ЖРД НК-33 в осевом и радиальном направлениях

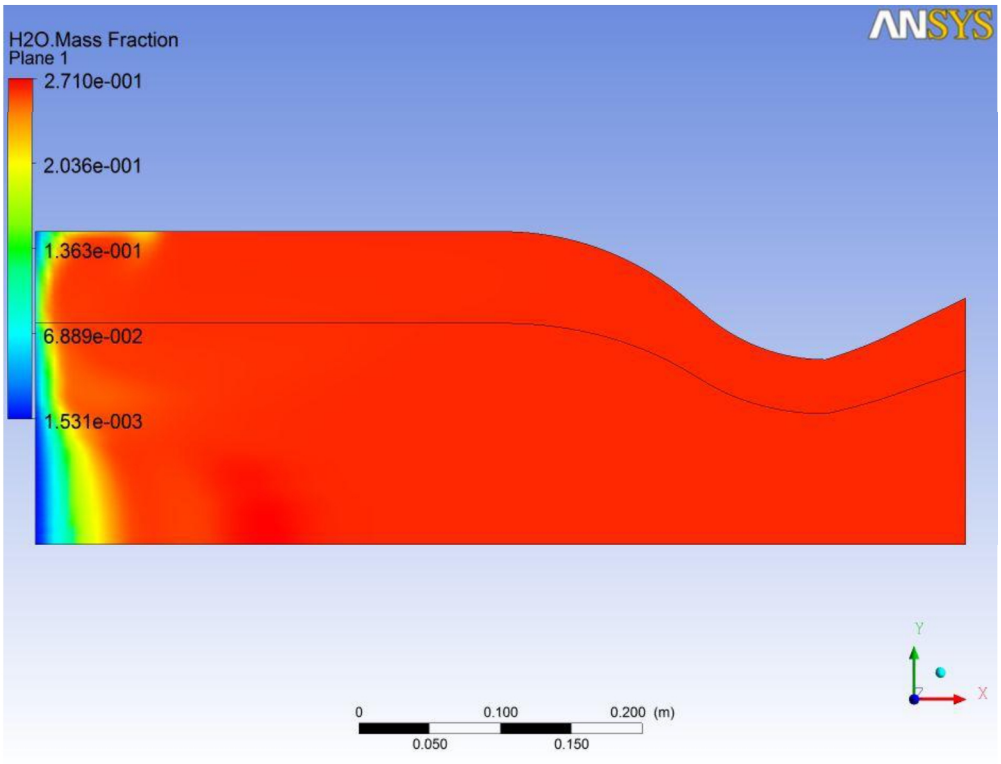

Рисунок 3.18 – Поле концентрации H_2O в объеме камеры ЖРД НК-33

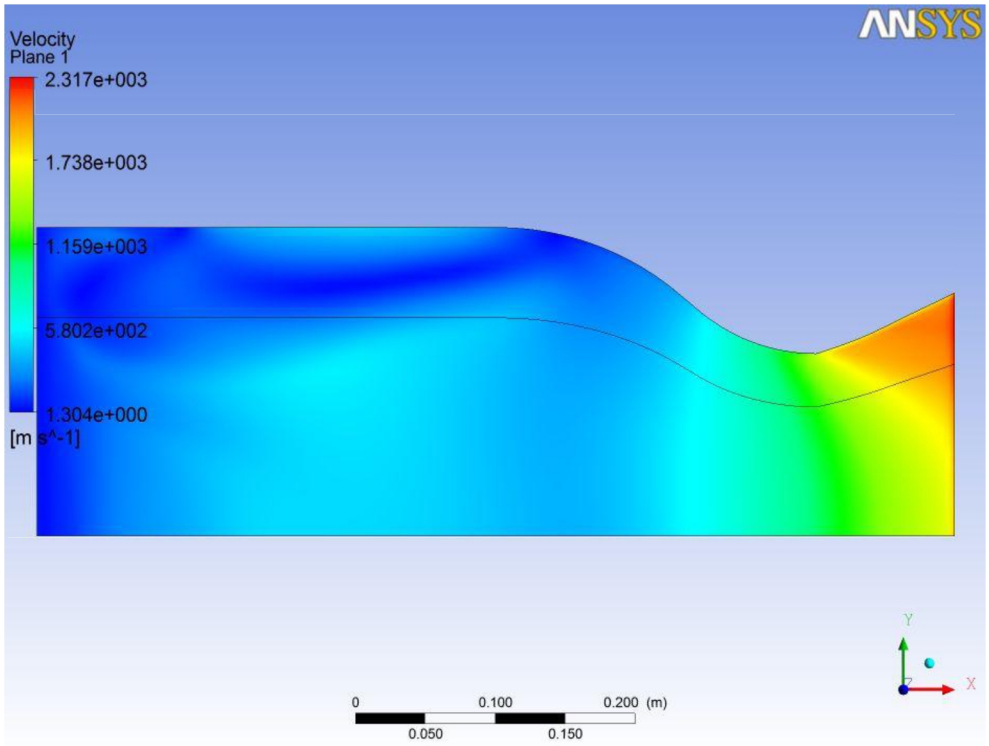

Рисунок 3.19- Поле скоростей продуктов сгорания в объеме камеры сгорания ЖРД НК-33

Более наглядно этот эффект показан на рисунке 3.17, где показано распределение чисел Маха в трех поперечных сечениях сопла – на входе в соп-

ло, в минимальном сечении сопла и в сечении вниз по потоку от минимального сечения сопла. Хорошо видно, что в первых двух сечениях поле чисел Маха является практически одномерным, а в последнем сечении поле чисел Маха имеет существенно двухмерный характер.

На рисунке 3.18 на примере распределения концентрации H_20 в объеме камеры сгорания показано, что процессы образования продуктов сгорания происходят вблизи плоскости форсуночной головки. Результаты, характеризующие формирование поля скоростей в объеме камеры сгорания ЖРД НК-33 показаны на рисунке 3.19. Эти результаты показывают, что скорость движения рабочего тела в камере сгорания изменяется в широком диапазоне- от 20 до 200 м/с.

Проведенное исследование приводит к выводу, что применительно к формированию проектного облика камеры использование Ansys CFX наиболее целесообразно на начальных стадиях проектирования для выбора наиболее эффективных способов организации рабочих процессов в камере сгорания ЖРД (стадиях НИР), а также на завершающей стадии проектирования для проведения тестовых расчетов. На других стадиях проектирования необходимо иметь возможность использовать методы расчета, менее требовательные к вычислительным и временным ресурсам.

4 РАЗРАБОТКА PDM - ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖРД НА ТОПЛИВЕ КЕРОСИН-КИСЛОРОД

4.1 Обоснование целесообразности объектно-ориентированного подхода к формированию проектного облика ЖРД

Изложенные в предыдущих разделах результаты основаны на классическом структурном подходе к формированию проектного облика ЖРД. При разработке технологии единого информационного пространства процесса проектирования целесообразно использовать объектно-ориентированный подход. В основе этого подхода положено использование иерархии объектов и иерархии классов, при этом иерархия классов обеспечивает наследственность свойств между уровнями иерархии, а любой объект является экземпляром определенного класса [45]. Взаимосвязь этих двух типов иерархий, показанная на рисунке 3.1, лежит в основе канонического описания сложных си-

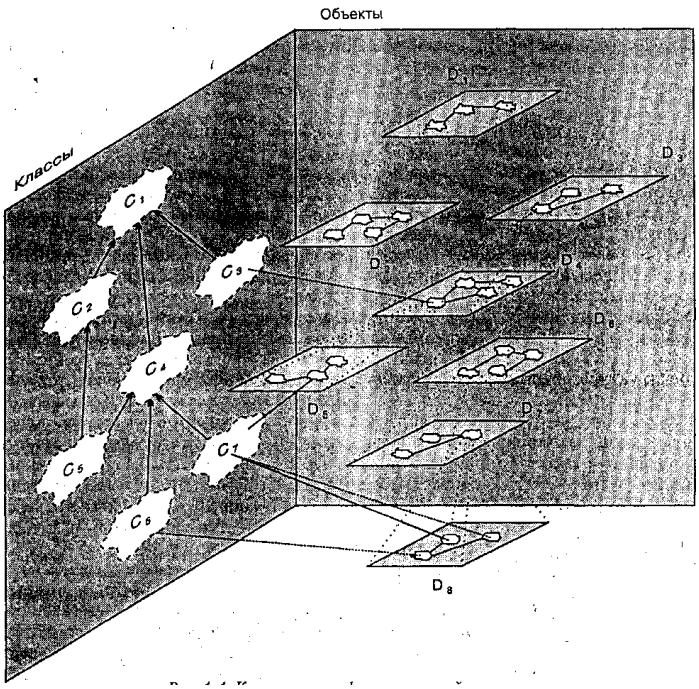

Рисунок 4.1- Каноническая форма сложной системы

стем в рамках объектно-ориентированного подхода [45].

На рисунке 4.1 приведены две ортогональных иерархии одной системы: классов и объектов. Каждая иерархия является многоуровневой, причем в ней классы и объекты более высокого уровня построены из более простых.

Какой класс или объект выбран в качестве элементарного, зависит от рассматриваемой задачи. Объекты одного уровня имеют четко выраженные связи, особенно это касается компонентов структуры объектов. Внутри любого рассматриваемого уровня находится следующий уровень сложности. Отметим также, что структуры классов и объектов не являются независимыми: каждый элемент структуры объектов представляет специфический экземпляр определенного класса. Как видно из рисунка 4.1, объектов в сложной системе обычно гораздо больше чем классов. Показывай обе иерархии, мы демонстрируем избыточность рассматриваемой системы. Если бы мы не знали структуру классов нашей системы, нам пришлось бы повторять одни и те же сведения для каждого экземпляра класса. С введением структуры классов мы размещаем в ней общие свойства экземпляров. Структуры классов и объектов системы вместе называются *архитектурой* системы [45].

В рамках объектно-ориентированного подхода вводятся такие понятия, как объектно-ориентированный анализ и проектирование - это метод, логически приводящий к объектно-ориентированной декомпозиции.

Поскольку основу проектирования составляет формирование моделей, объектно-ориентированное проектирование предлагает богатый выбор моделей, которые представлены на рисунке 4.2. Эти объектно-ориентированные модели проектирования отражают иерархию и классов, и объектов системы, а также покрывают весь спектр важнейших конструкторских решений, которые необходимо рассматривать при разработке сложной системы [45].

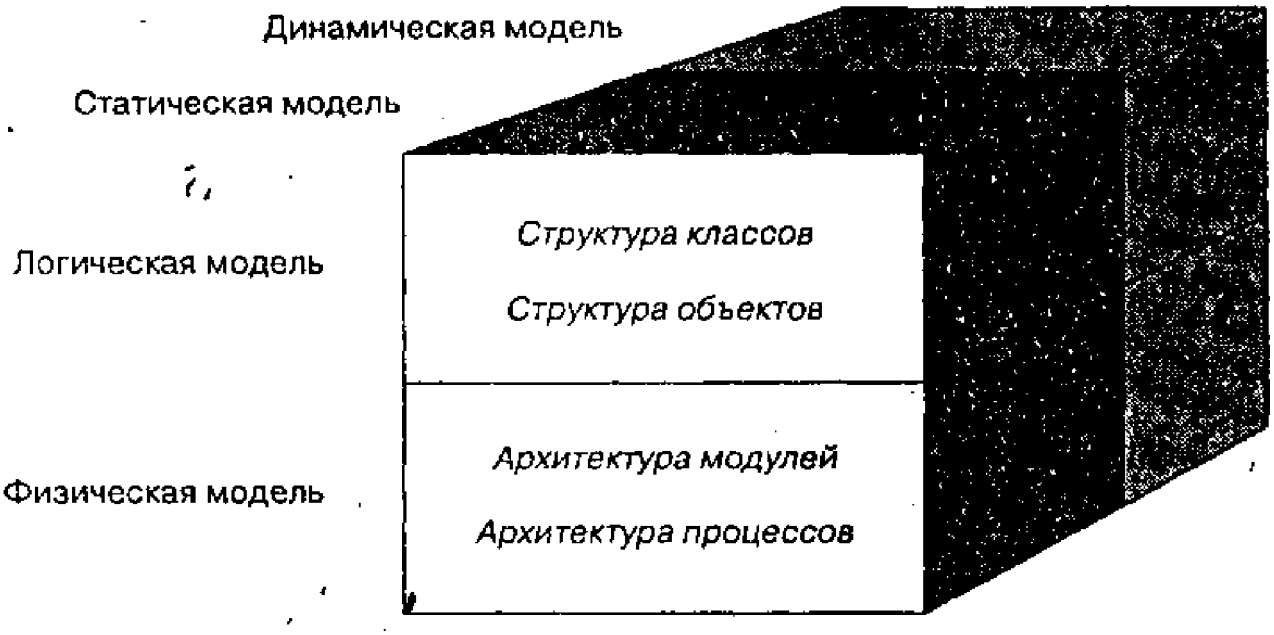

Рисунок 4.2 . Объектно-ориентированные модели

4.2Структура классов и ее использование для хранения данных о проектном облике ЖРД в PDM-системе Smarteam

Применение на практике объектного подхода к описанию изделия требует использования удобной системы классификации. Общепринятое определение класса – набор объектов, которые совместно используют общую структуру и общие атрибуты.

4.2.1 Описание структуры классов

Для хранения данных о проектном облике ЖРД в среде PDM-систем можно выделить классы объектов, следующей структуры (рисунке 3.3). Здесь, в рамках метакласса «Технический объект» выделены следующие основные классы:

- Класс «**Предмет**» позволяет группировать информацию объекты информации непосредственно о самом изделии.

Информация о ЖРД группируется в виде документов подклассов: «Продукция», «Материал» и «Оборудование».

Подкласс «Продукция» описывается с помощью подклассов: «Детали», «Сборочные единицы» и «Изделия», которые в свою очередь подразделяются на подклассы «Прототипы зарубежные» и «Прототипы отечественные».

Подкласс «Материал» также подразделяется на «Материалы зарубежные» и «Материалы отечественные».

Подкласс «Оборудование» подразделяется на «Станки», «Оснастку» и «Инструменты».

- Класс «**Процессы**» позволяет группировать информацию о процессах, выполняемых с изделием - ЖРД при формировании его проектного облика.

Выделяем подклассы: «Процессы проектирования», «Процессы конструирования», «Технологические процессы» и «Бизнес процессы».

В свою очередь, подкласс «Процессы проектирования» включает в себя такие подклассы как «Анализ», «Синтез» и «Моделирование».

Подкласс «Моделирование» подразделяется на «Термодинамическое», «Газодинамическое», «Гидродинамическое», «Горения» и «Массо и теплообмена».

- Класс «**Документы**» позволяет группировать информацию обо всех документах, участвующих в описании изделия.

Здесь указываются подклассы «Виды документов» и «Форматы документов».

- Класс «**Проекты**» позволяет группировать информацию, связанную с реализацией во времени используемых процессов.

Здесь производится подразделение проектов по стадиям жизненного цикла изделия: «На стадии проектирования», «На стадии технологической подготовки производства», «На стадии изготовления» и «На стадии эксплуатации».

Поскольку настоящей работе формирование проектного облика ЖРД рассматривается на стадии проектирования, необходимо выделить подклассы проектов по такому признаку класса как «этап проектирования»: «Техниче-

ское предложение (ТП)», «Эскизный проект (ЭП)», «Технический проект» и «Рабочий проект (РП)».

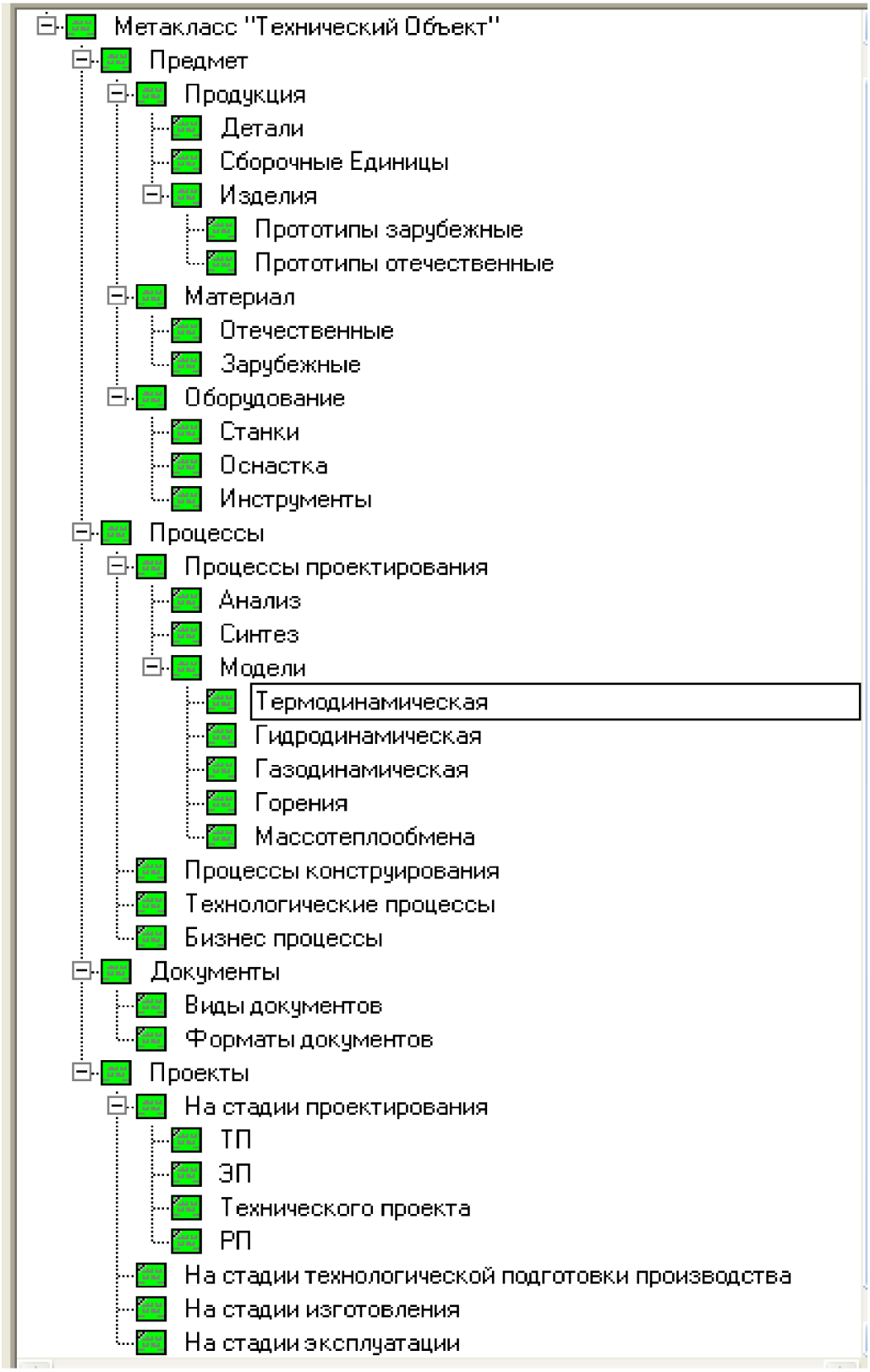

Рисунок 4.3 - Структура классов для хранения данных о проектном облике ЖРД

4.2.2 Реализация структуры классов для хранения данных о проектном облике ЖРД

В PDM-системе Smarteam объекты вышеописанных классов группируются в иерархические деревья и в зависимости от настройки могут иметь сетевые связи.

Дерево объектов класса «Проекты» являются основным деревом, к которому логическими (сетевыми) связями присоединяются деревья объектов класса «Документы» и «Процессы». Объекты класса «Предмет» представляются в виде деревьев «Документы» с организованной интеграцией работы с соответствующими форматами с помощью пакетов программ, в которых они созданы (рисунки 4.4 – 4.11).

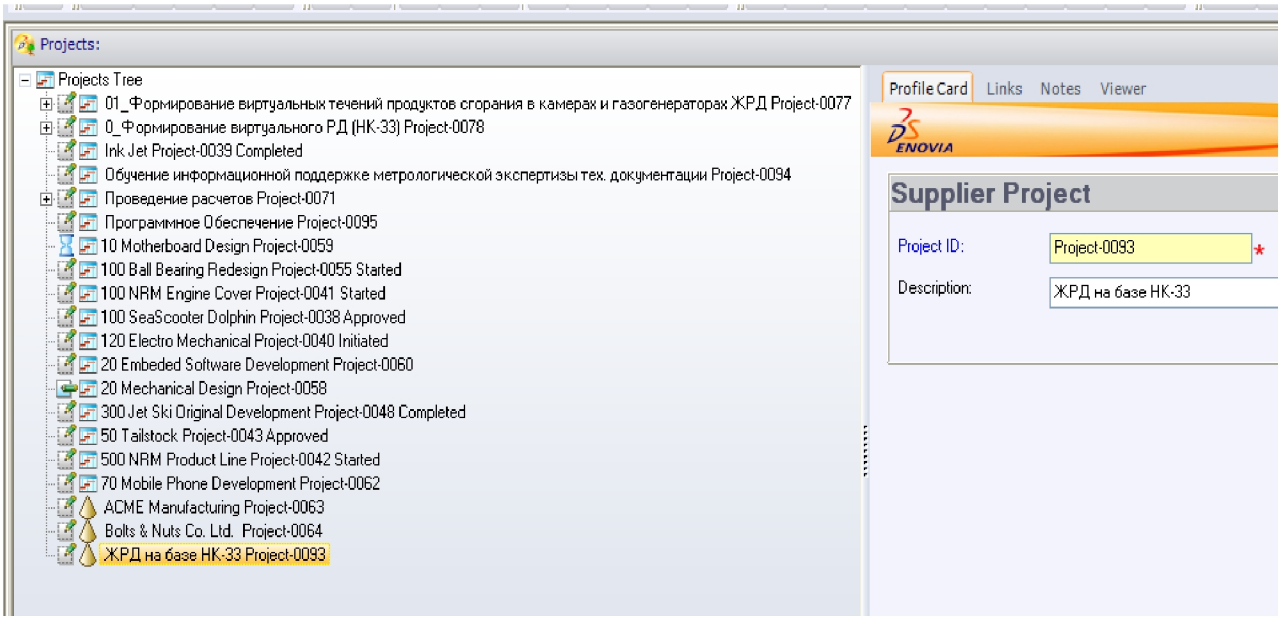

Рисунок 4.4 – Дерево объектов класса «Проект» для хранения данных о проектном облике ЖРД

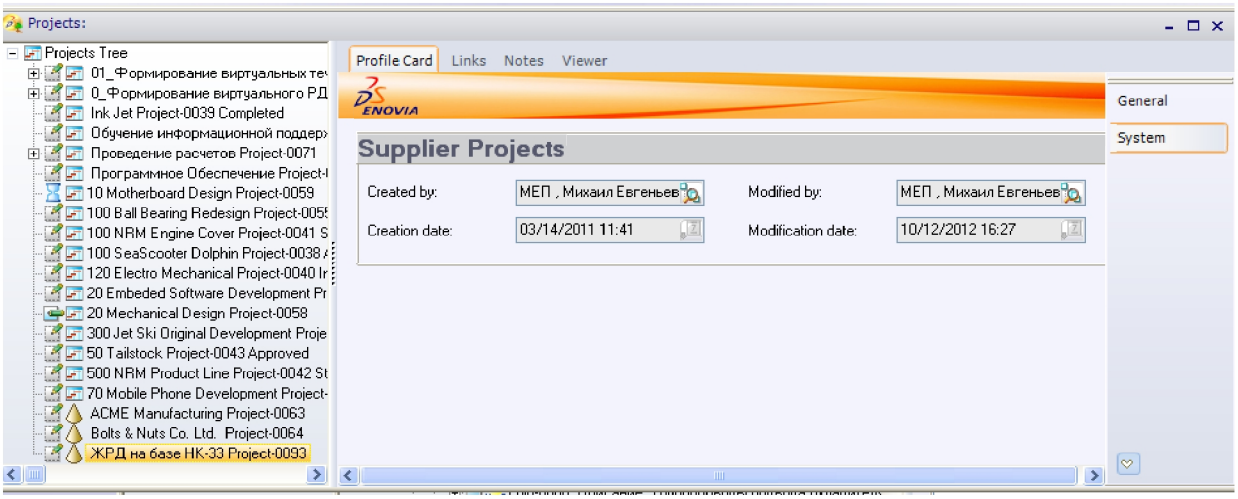

Рисунок 4.5 – Паспорт описания объектов класса «Проект»

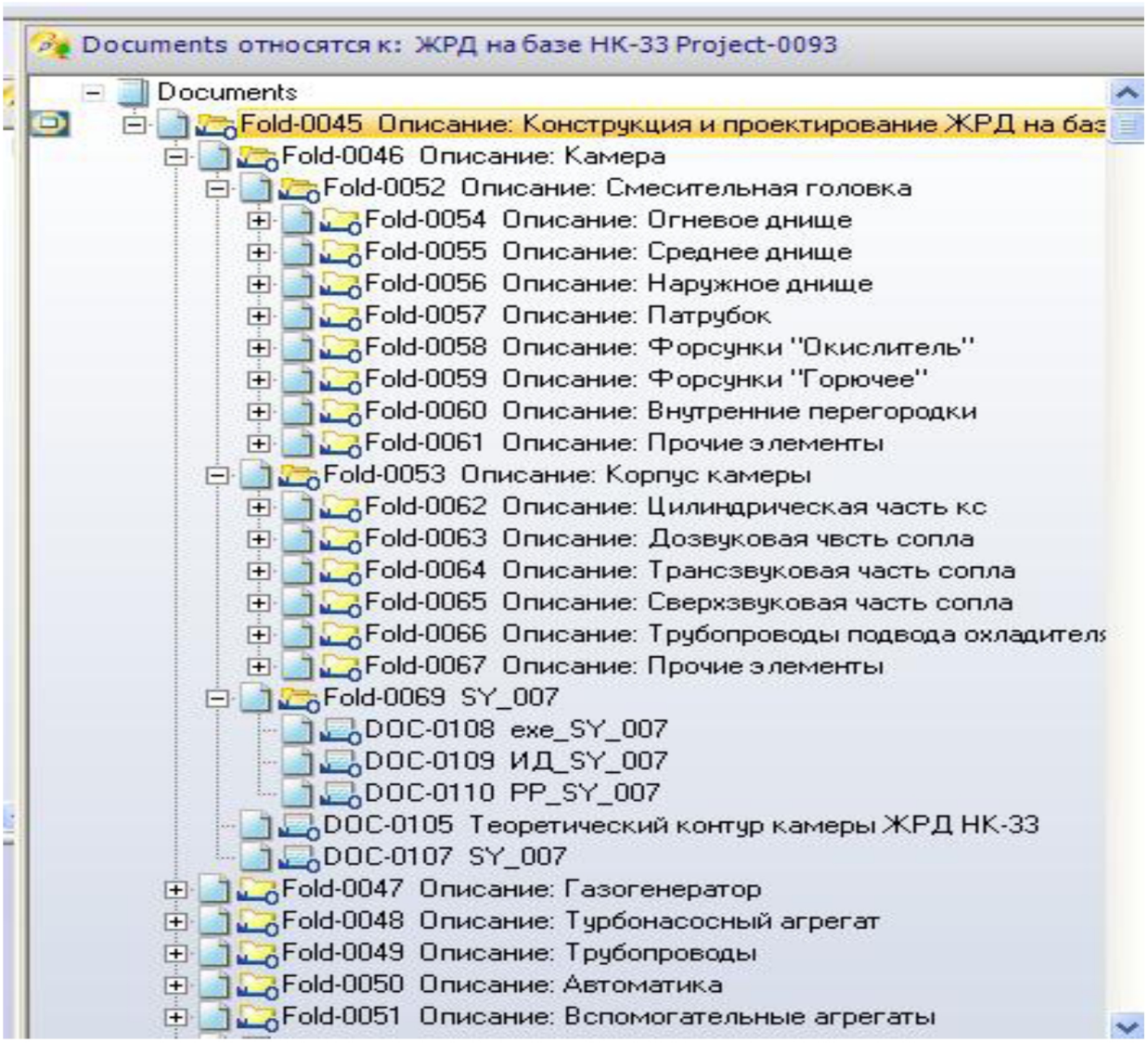

Рисунок 4.6 – Описание объектов класса «Предмет» в виде дерева документов различных классов

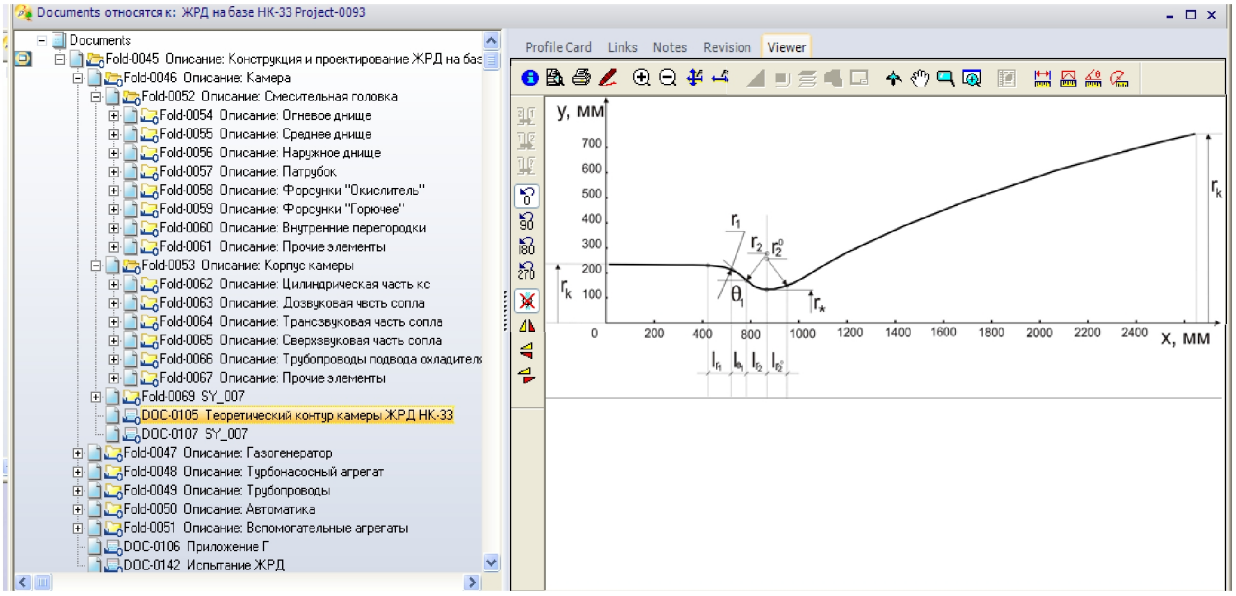

Рисунок 4.7 – Описание объекта класса «Предмет» «Изделия» «Прототипы отечественные» - «Теоретический контур камеры ЖРД НК-33

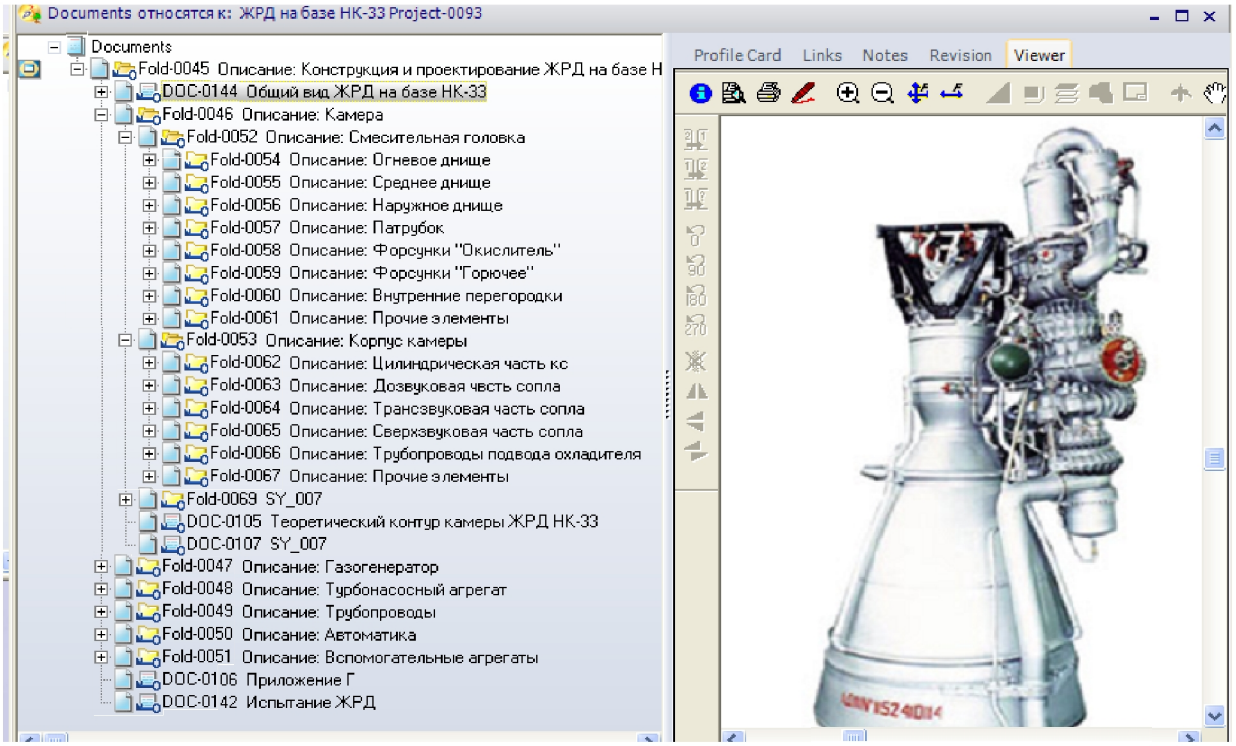

Рисунок 4.8 – Описание объекта класса «Предмет» «Изделия» «Прототипы отечественные» - «Документ» «Общий вид ЖРД на базе НК-33»

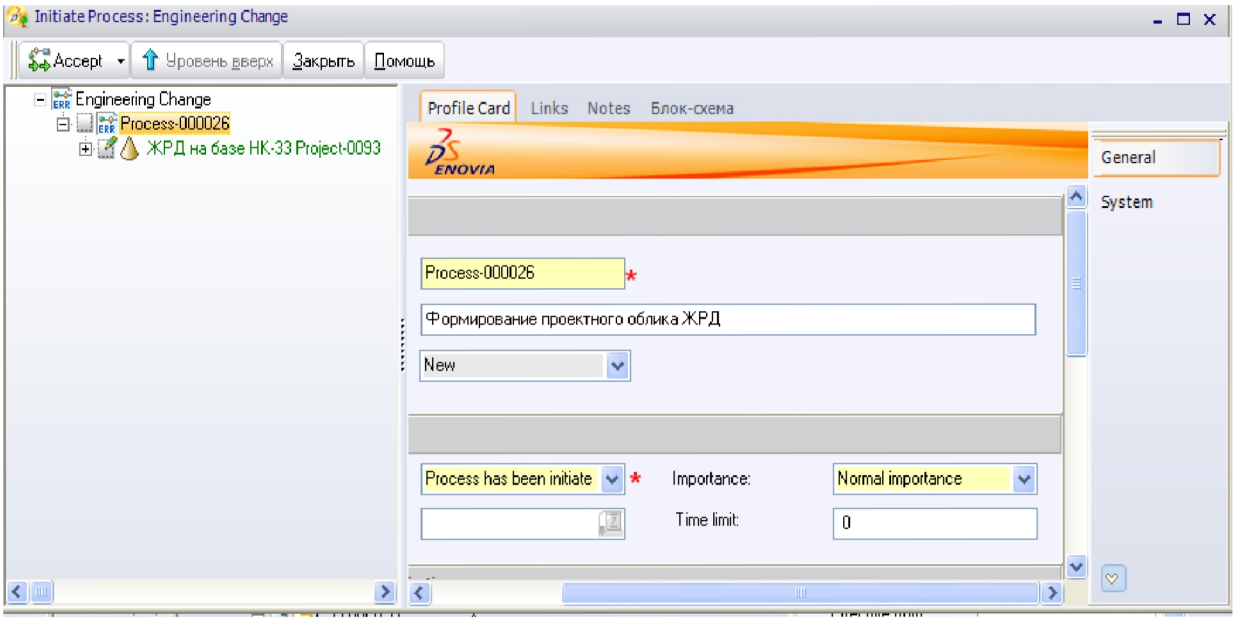

Рисунок 4.9 – Описание объекта класса «Процесс» - «Формирование проектного облика ЖРД» - паспорт объекта

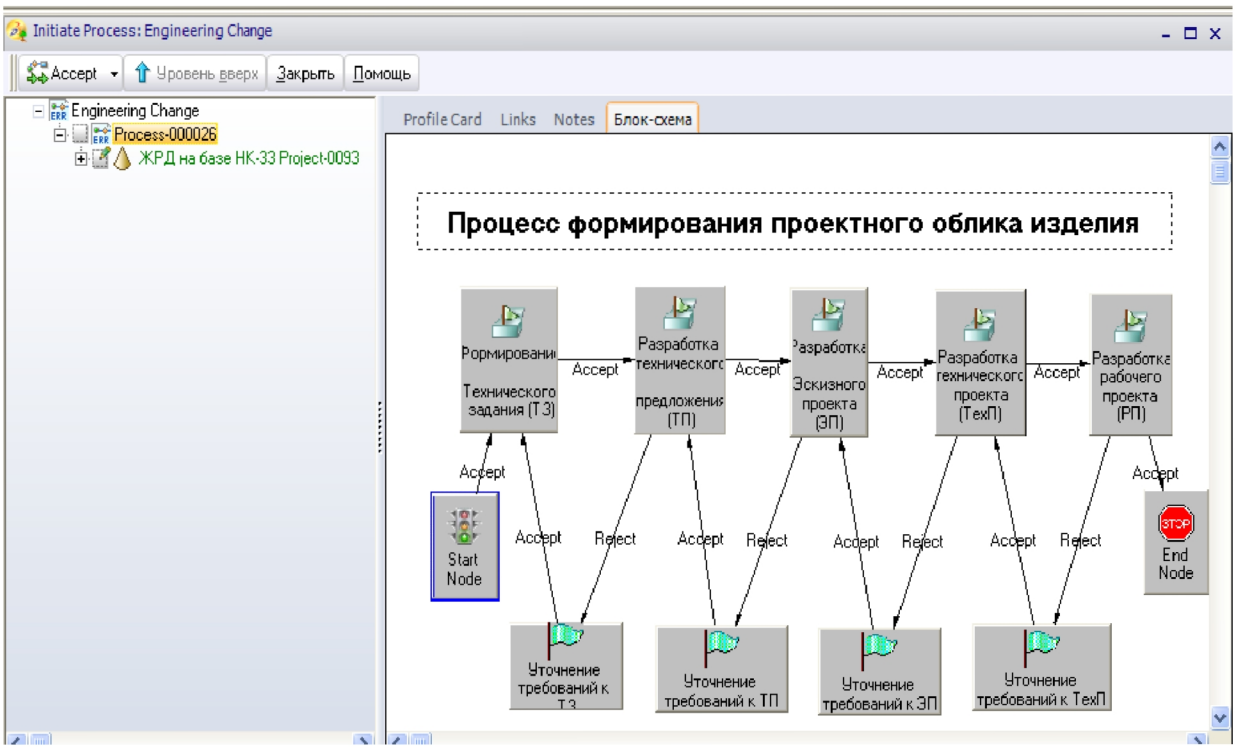

Рисунок 4.10 – Описание объекта класса «Процесс» - «Формирование проектного облика ЖРД» - Блок схема процесса

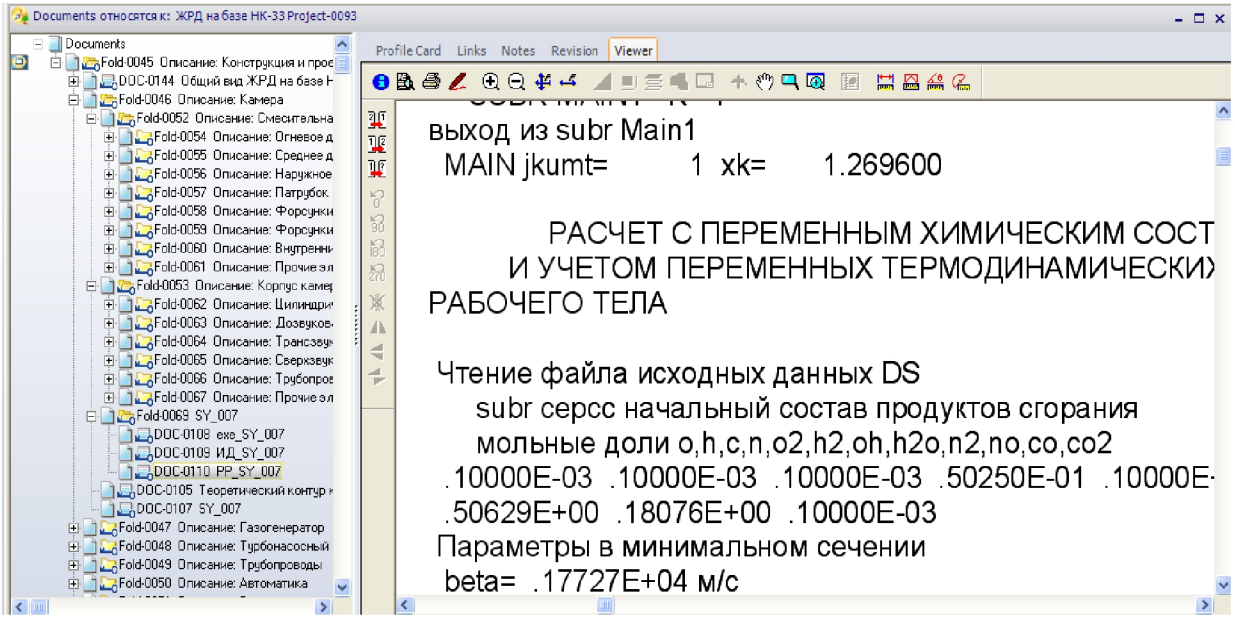

Рисунок 4.11 – Описание объекта класса «Процесс» - «Термодинамическая модель камеры» - «Документ» Результат расчета «На стадии разработки технического предложения»

4.3Использование данных в PDM-системе Smarteam для оптимальной организации проектных процедур

Структура данных в PDM-системе SMARTEAM организуется с помощью классов и подклассов и отображается в виде дерева:

- Суперкласс.
- Абстрактный класс.
- Подкласс.

Суперкласс: Это - самый высокий уровень группирования набора информации с одинаковыми характеристиками (Обычно устанавливаются в виде «иконок» в панели инструментов.

Известные суперклассы:

Проекты - Документы - Материалы - Части - Контакты – Пользователи - …

В нашем случае для описания проектирования ЖРД это: **Проекты** – **Документы** – **Предметы - Процессы**

В каждом Суперклассе возможно использование двух классов:

Абстрактный Класс (Папка): логический подкласс, который не содержит никакого объекта, используемый для группирования дерева связей в пределах основного модуля PDM SMARTEAM - Editor.

Листовой класс: подкласс на самом нижнем уровне дерева, где фактически сохраняются объекты.

В SMARTEAM только к Листовым классам производится обращение как к объектам. Суперклассы и Абстрактные Классы могут использоваться при поиске информации с более высокого уровня.

Суперклассы позволяют организовать информацию по категориям.

Все объекты, созданные в SMARTEAM, это экземпляры подклассов. В данном примере на рисунке 4.12 каждый узел дерева – экземпляр подклассов.

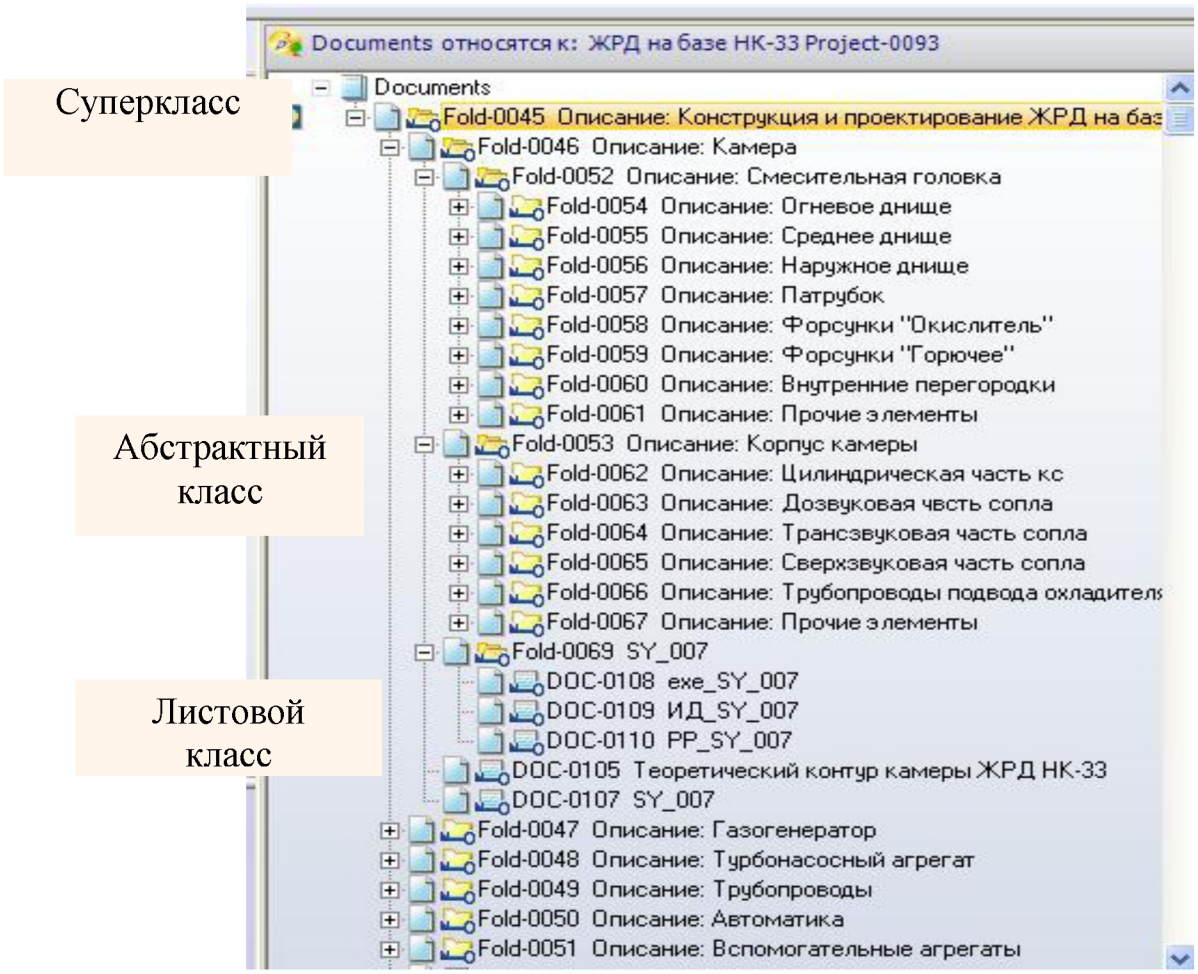

Рисунок 4.12 - Пример структуры документов

Для оптимальной организации проектных процедур необходимо сформировать деревья объектов указанных выше классов, чтобы определяя связи между ними быстро получать доступ к нужной информации.

Формирование объектов класса ПРОЕКТ позволяет так спланировать выполнение процессов, чтобы выполнять работу в заданный срок и в соответствии с выделенным на ее выполнение бюджетом.

Покажем эту возможность на примере выполнения сложного процесса «Формирования проектного облика изделия». Когда процесс инициирован в PDM-системе (рисунок 4.13) – ему присваивается порядковый номер, например «Process-000026». Появляется возможность пройти по всем стадиям проектирования, чтобы уточнить состав и структуру всех присоединенных к нему объектов (в рассматриваемом случае, относящихся к объекту класса ПРОЕКТ «ЖРД на базе НК-33»).

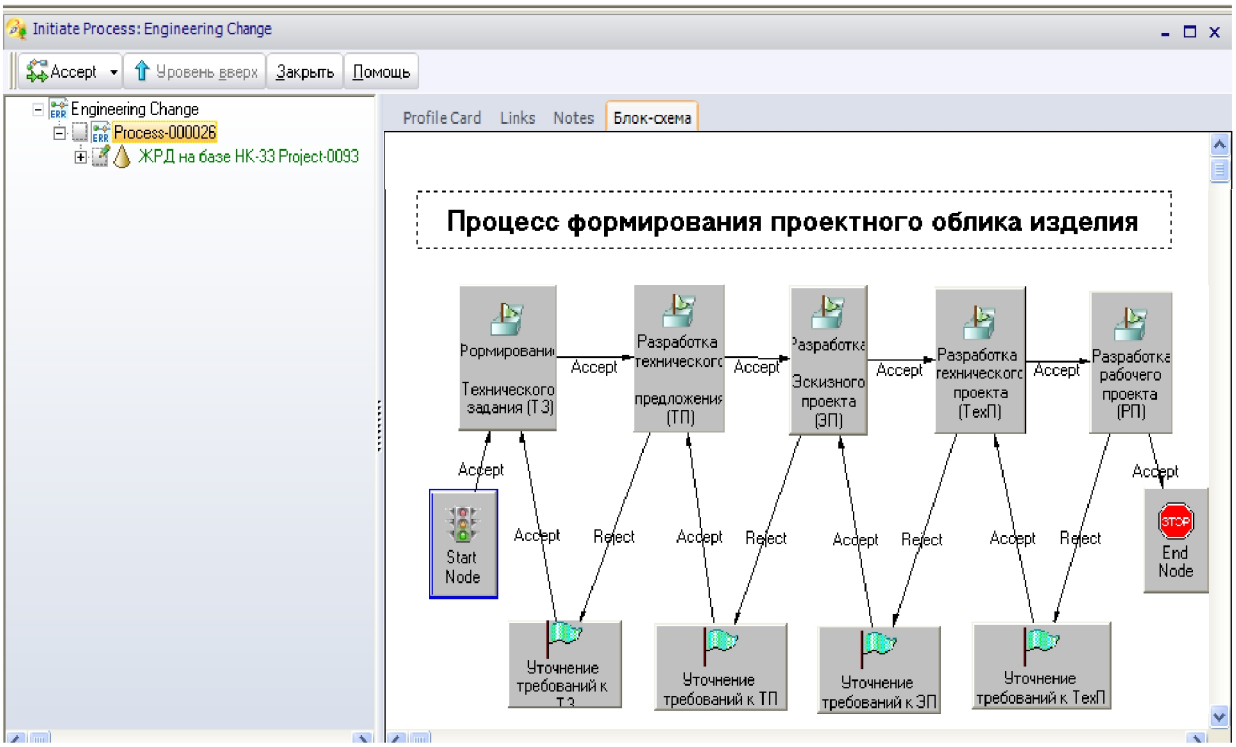

Рисунок 4.13 – Инициирование Процесса - «Процесс формирования проектного облика ЖРД» - Блок схема процесса

Перемещаясь по блок-схеме этого процесса на стадию «Разработка технического предложения» (рисунки 4.14 – 4.15), производится выполнение

операции «Блочно-иерархическая декомпозиция» информационного потока «Техническое задание».

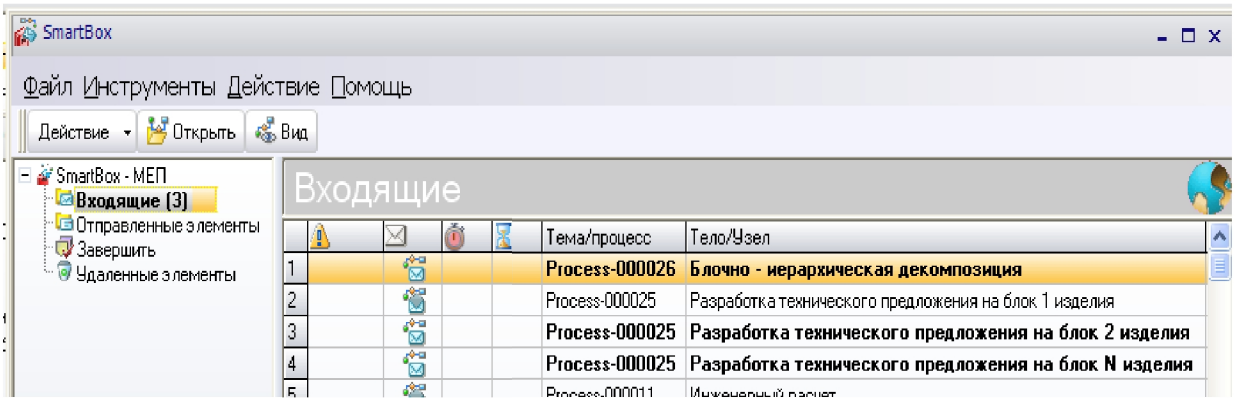

Рисунок 4.14 – Использование внутренней электронной почты SmartBox для движения по процессу «Формирования проектного облика изделия» «Process-000026»

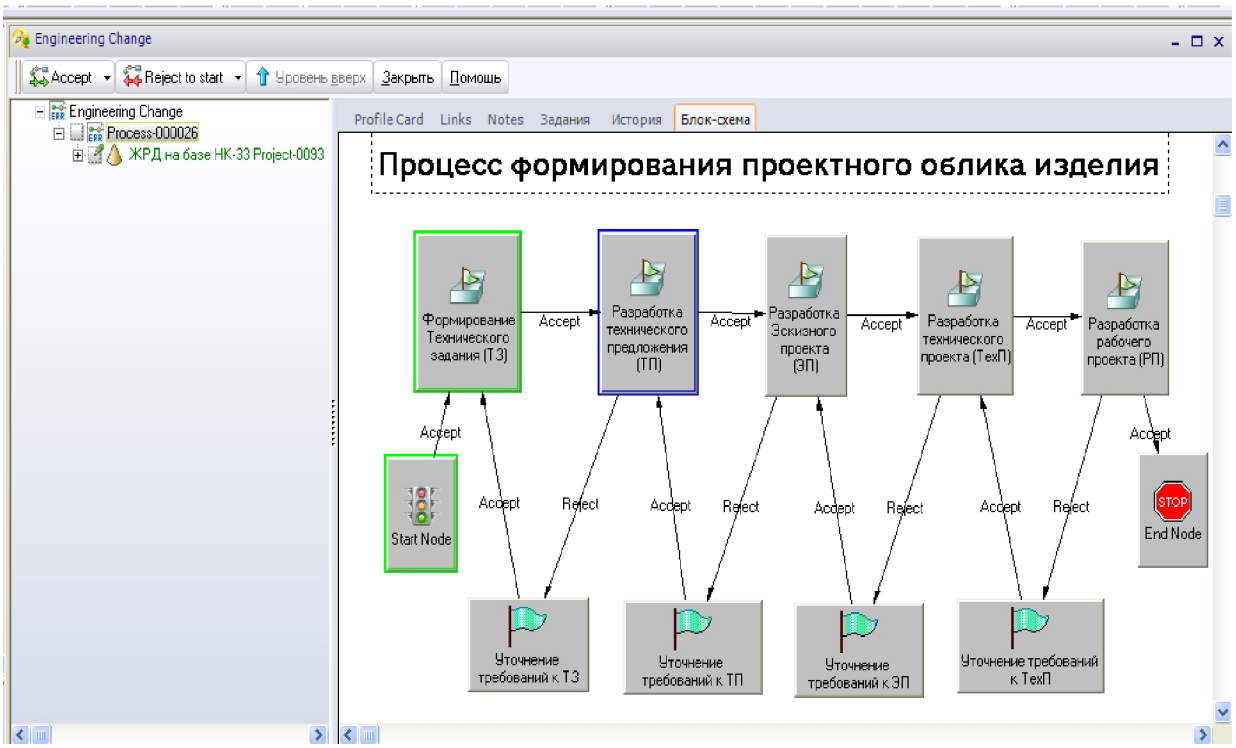

Рисунок 4.15 – Выполнение процесса Process 000026 на стадии - «Разработка технического предложения»

В результате движения по заданному процессу формируется структура объектов других классов, которые на логическом уровне связываются друг с другом, образуя удобную для работы структуру (рисунки 4.16 – 4.20)

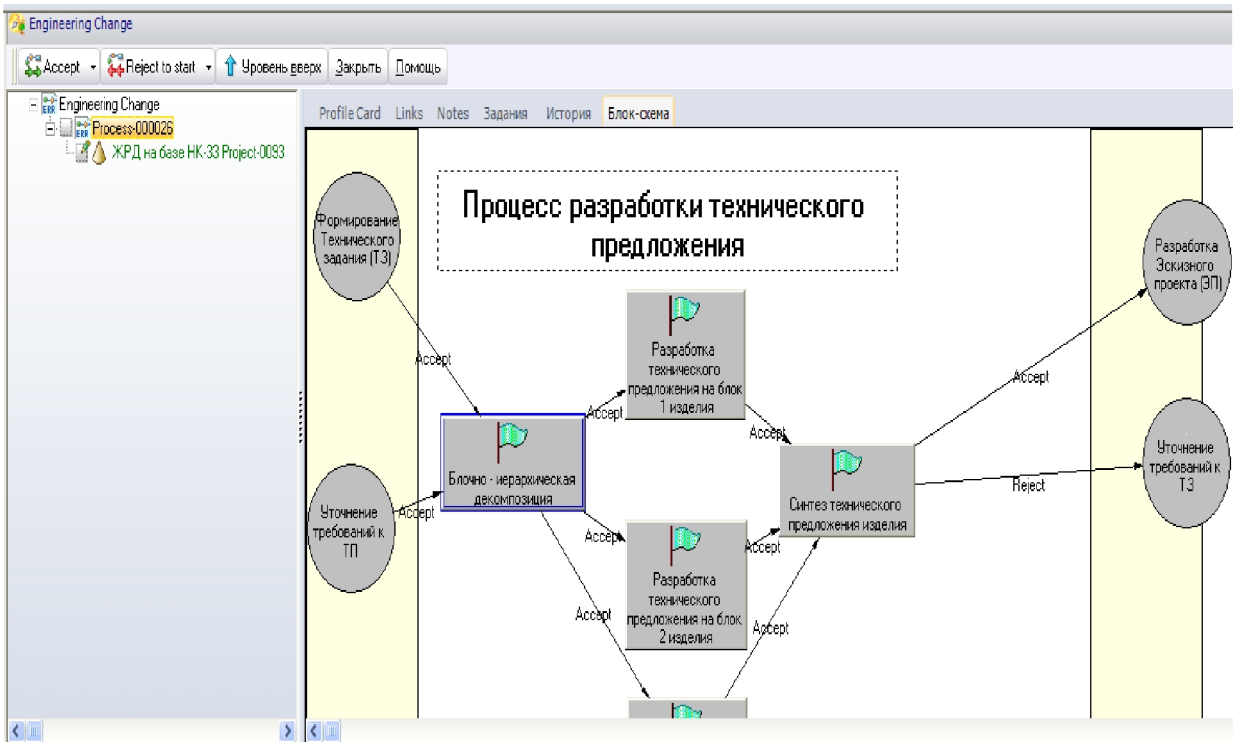

Рисунок 4.16 – Описание объекта класса «Процесс» - этап «Блочно иерархическая декомпозиция

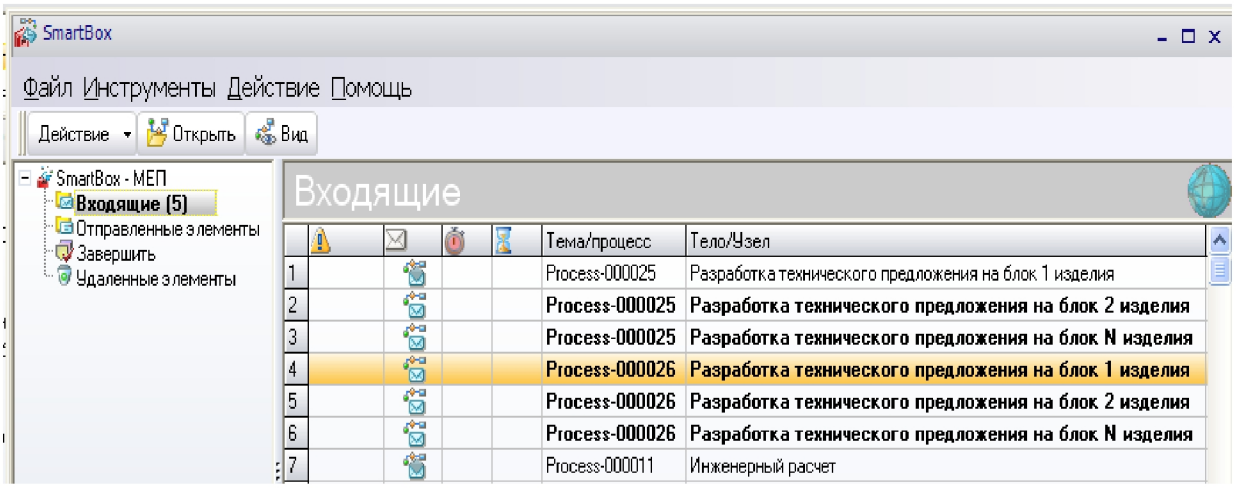

Рисунок 4.17 – Использование внутренней электронной почты SmartBox для движения по процессу «Формирования проектного облика изделия» переход на стадию «Разработка технического предложения на блок»

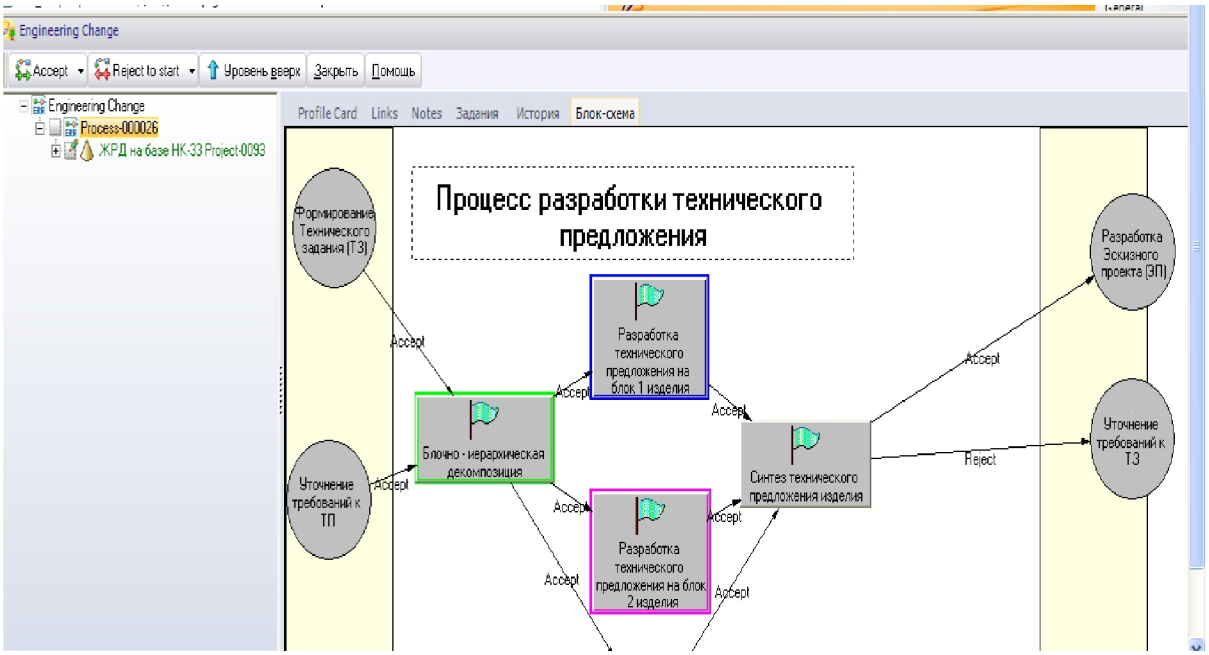

Рисунок 4.18 – Блок-схема движения по процессу «Формирования проектного облика изделия» переход на стадию «Разработка технического предложения на блок»

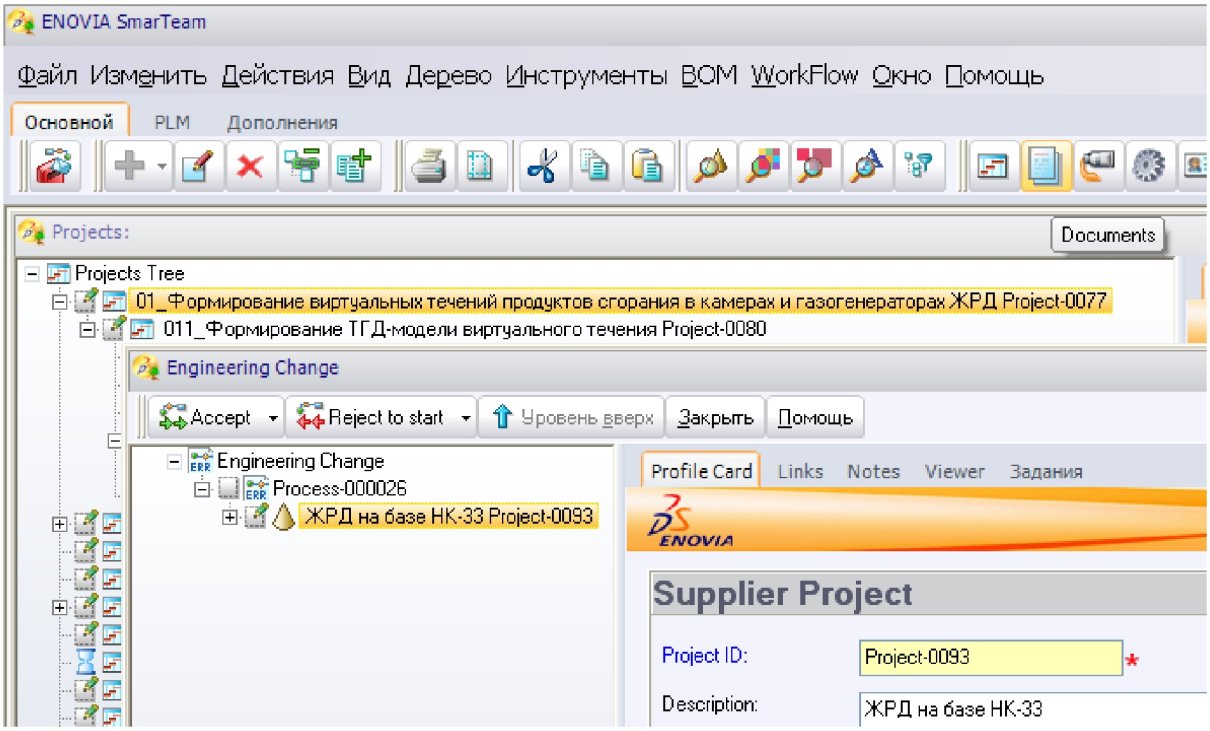

Рисунок 4.19 – Выбор объектов суперкласса «Документы» для изменения в рамках проекта «ЖРД на базе НК-33 Project-0093»

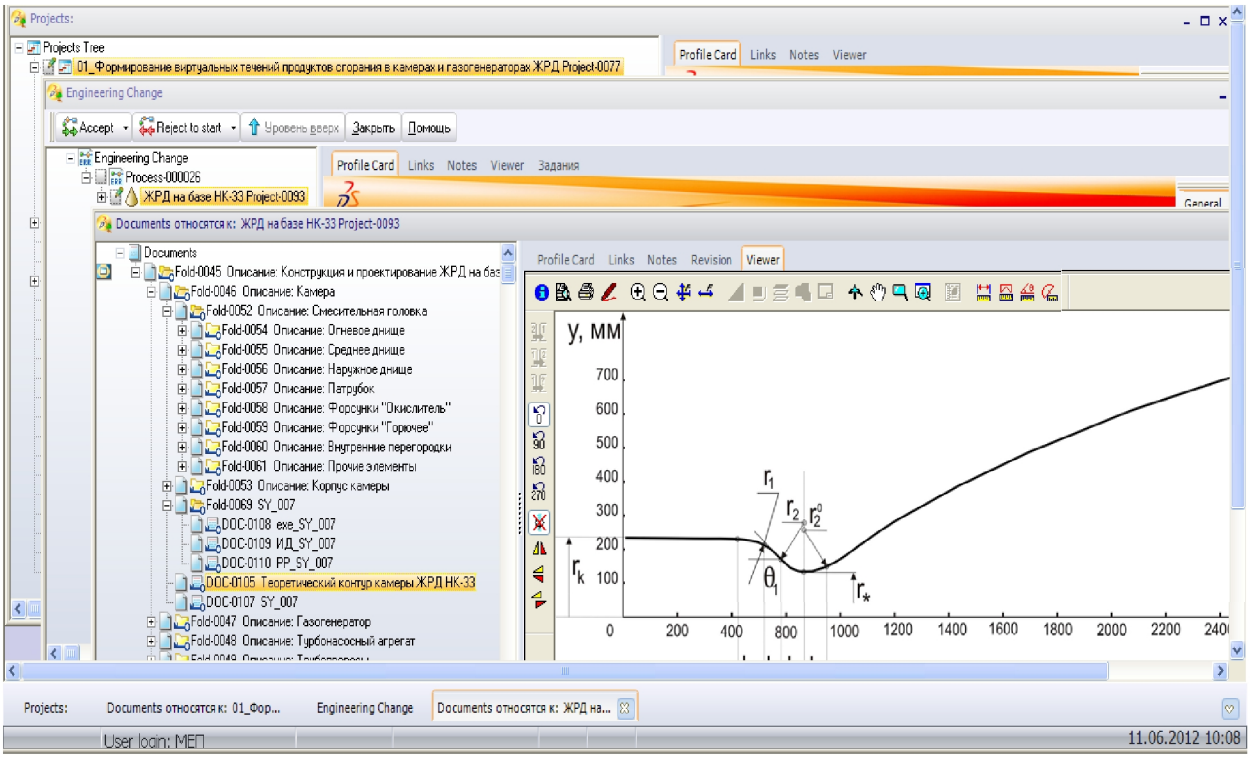

Рисунок 4.20 – Редактирование объекта суперкласса «Документы» DOC-0105 Теоретический контур камеры ЖРД НК-33

Для выполнения проектной процедуры «Разработки технического предложения на блок изделия» в PDM-системе запускается новый процесс «Process-000027» как показано на рисунке 4.21, который несет в себе задания, соответствующие проектным операциям над объектами класса «Документы», сгруппированными в папке «Fold-0045 Описание: Конструкция и проектирование ЖРД на базе НК-33». В этой папке собрана информация об объектах, используемых в рассматриваемом блоке изделия.

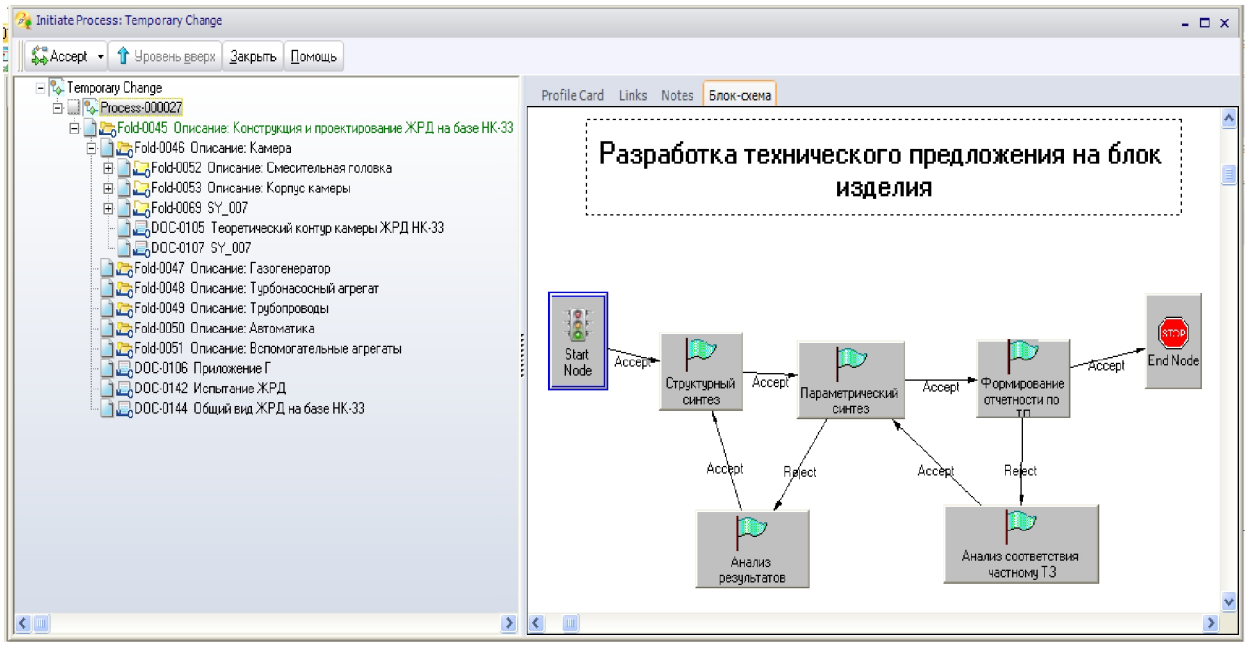

Рисунок 4.21 – Инициация процесса «Process-000027» с присоединенной папкой с объектами описания изделия «Fold-0045 Описание: Конструкция и проектирование ЖРД на базе НК-33»

Ниже показана технология информационной поддержки выполнения проектной процедуры «Термогазодинамический расчет камеры ЖРД НК-33 в идеальном приближении с использованием программного комплекса S, разработки Научно – исследовательского центра космической энергетики СГАУ (авторы Н.В.Безменова, С.А.Шустов). Для информационной поддержки этой процедуры необходимо обеспечить хранение исходных данных (ИИ) и результатов выполнения расчетов (РР) (рисунки 4.22 – 4.24).

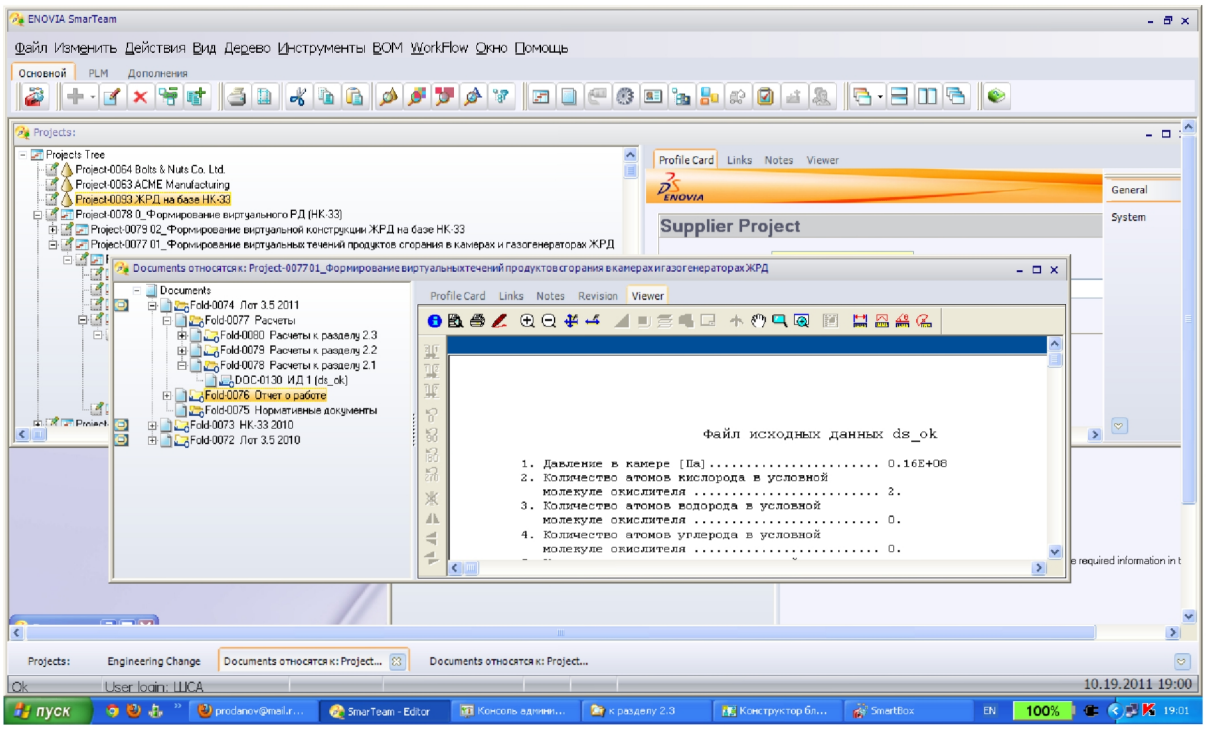

Рисунок 4.22 – Исходные данные для расчета – объект «ИД1 (ds_ok)»

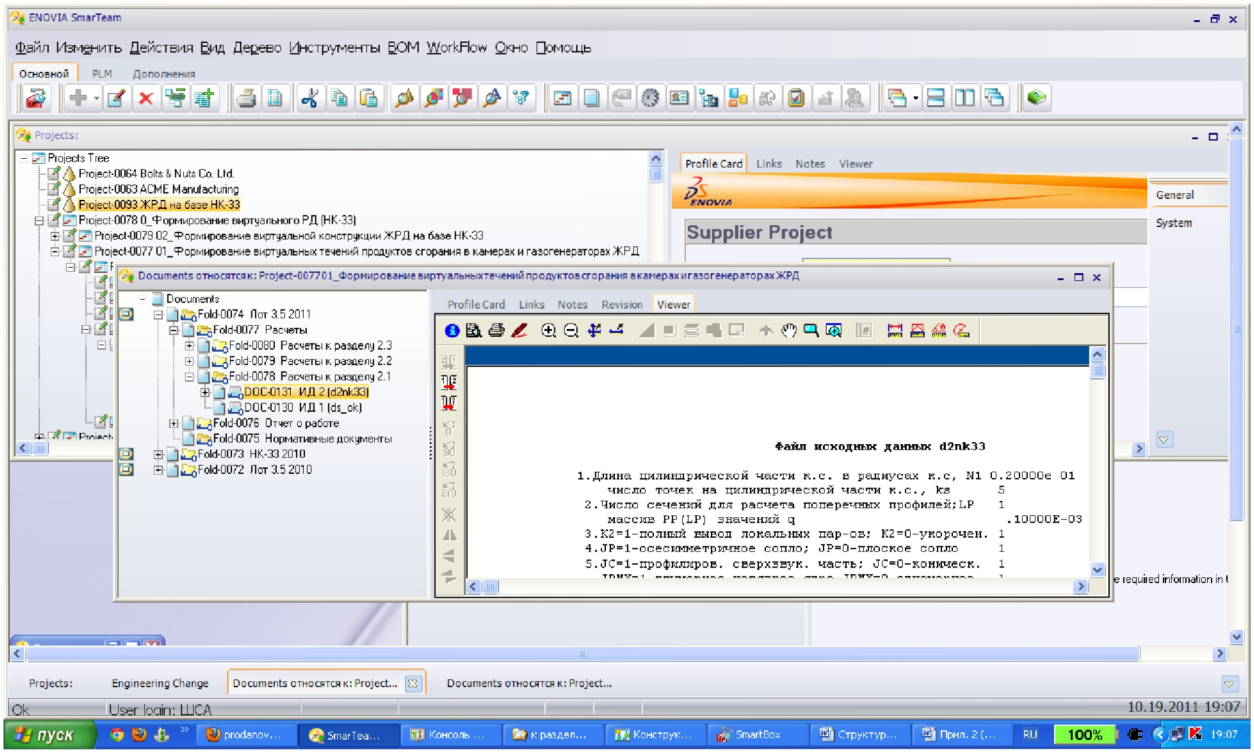

Рисунок 4.23 – Исходные данные для расчета - объект «ИД2 (d2nk33)»

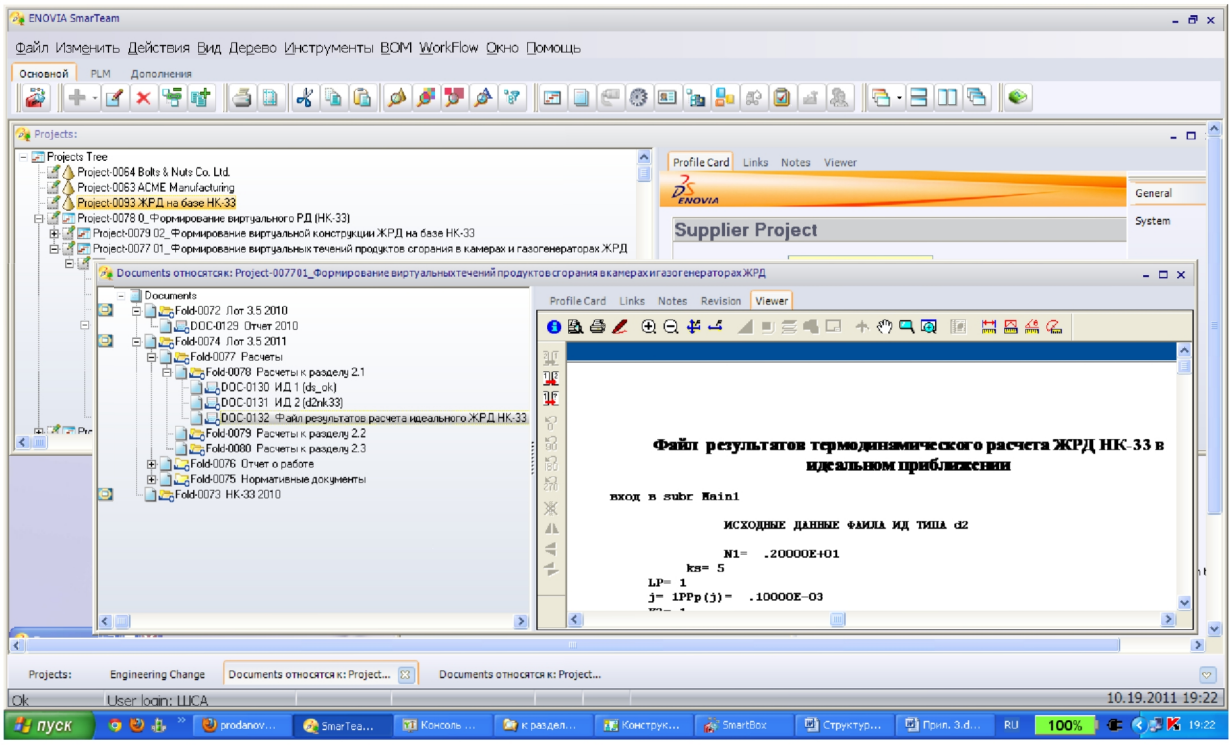

Рисунок 4.24 – Результаты термогазодинамического расчета ЖРД НК-33 в идеальном приближении – объект «Файл результатов расчета идеального ЖРД НК-33»

Далее на рисунках 4.25 – 4.30 показана технология информационной поддержки выполнения проектной процедуры «Термогазодинамический расчет камеры ЖРД НК-33 с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

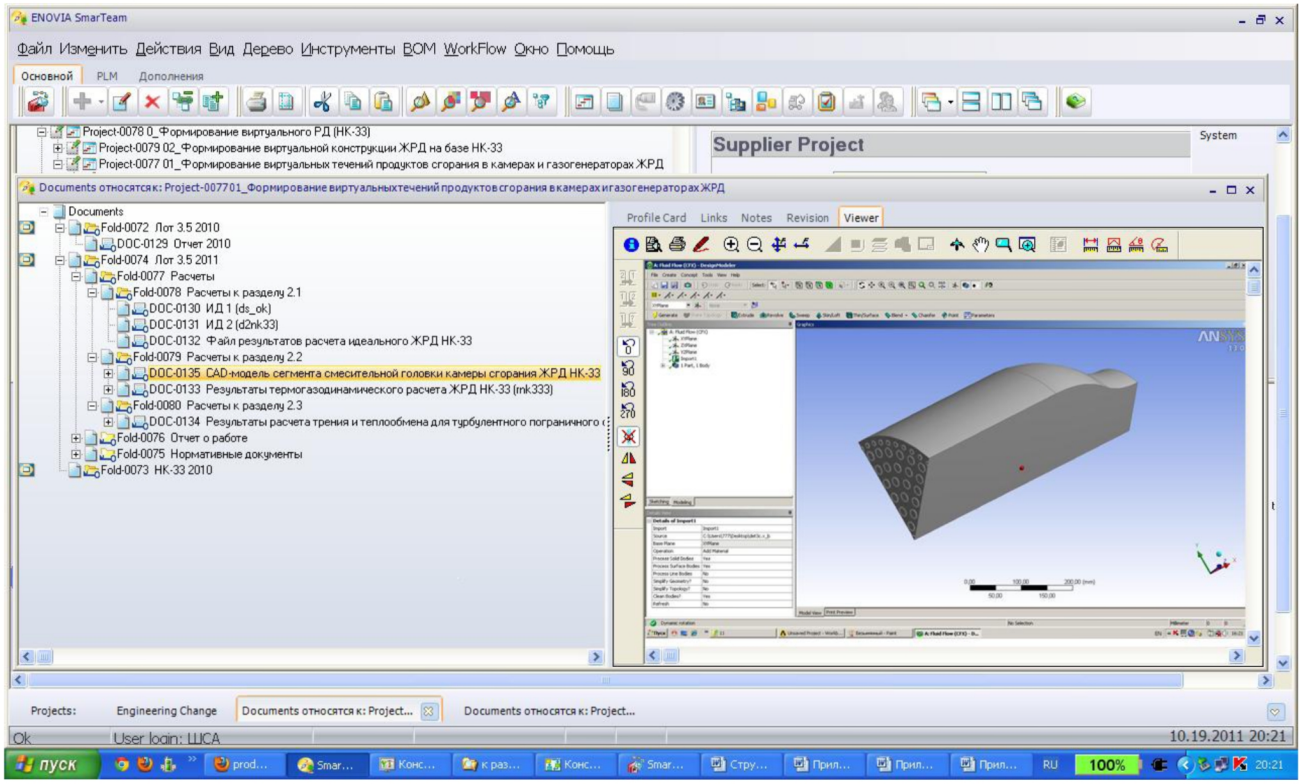

Рисунок 4.25 – CAD-модель сегмента смесительной головки камеры сгорания ЖРД НК-33

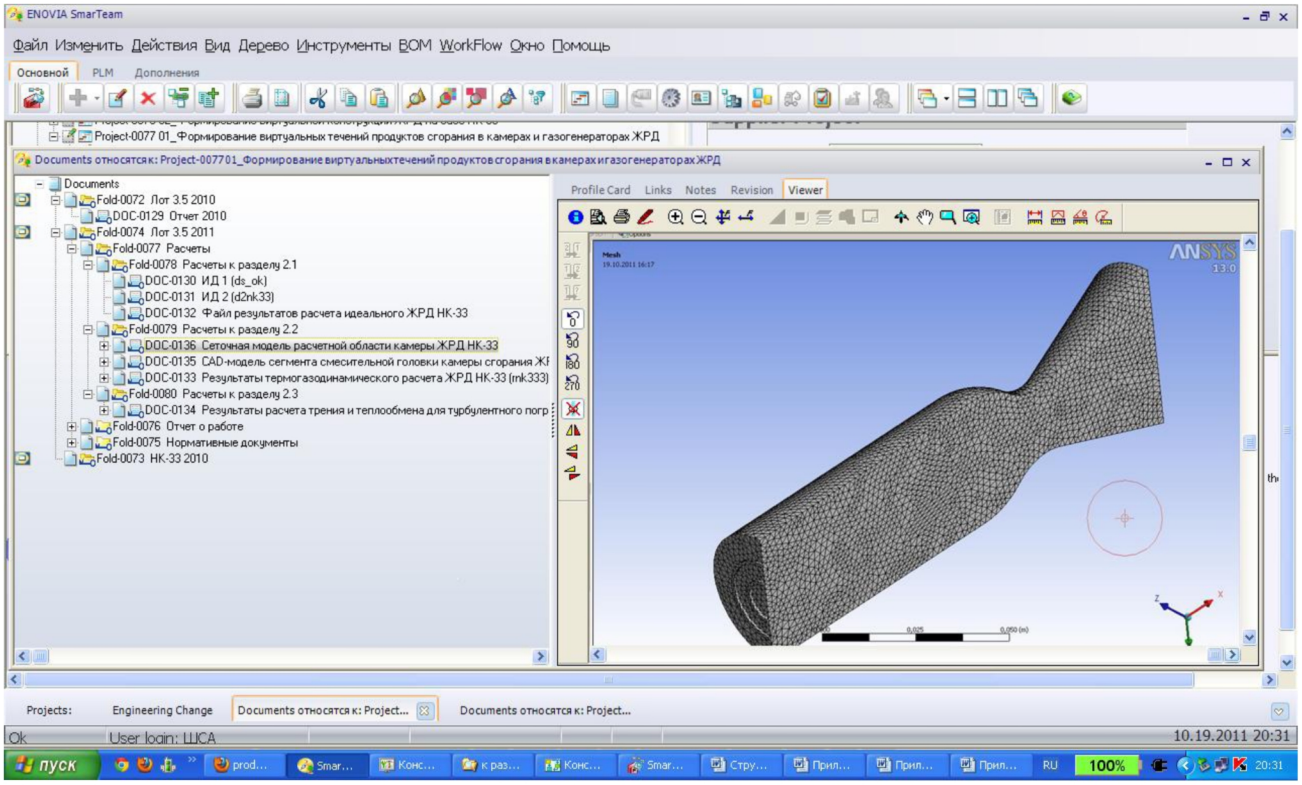

Рисунок 4.26 – Сеточная модель расчетной области камеры ЖРД НК-33

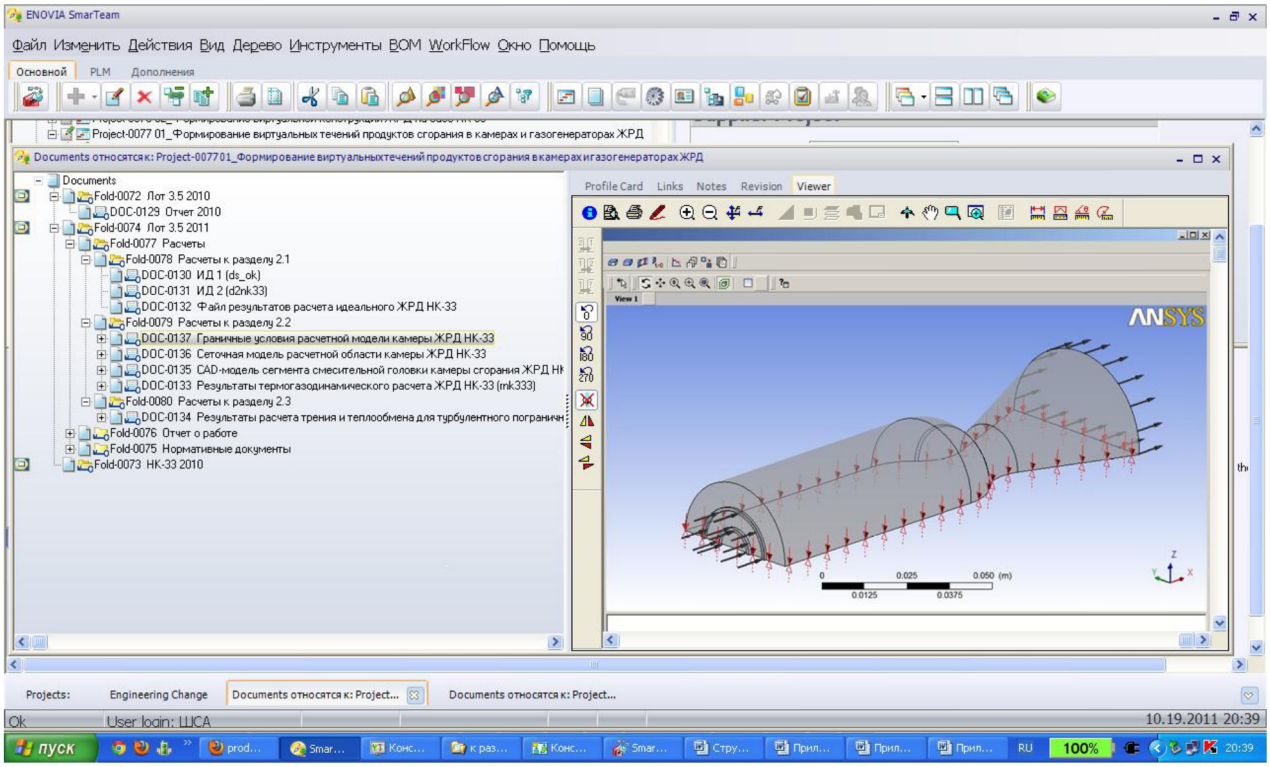

Рисунок 4.27 – Граничные условия расчетной модели камеры ЖРД НК-33

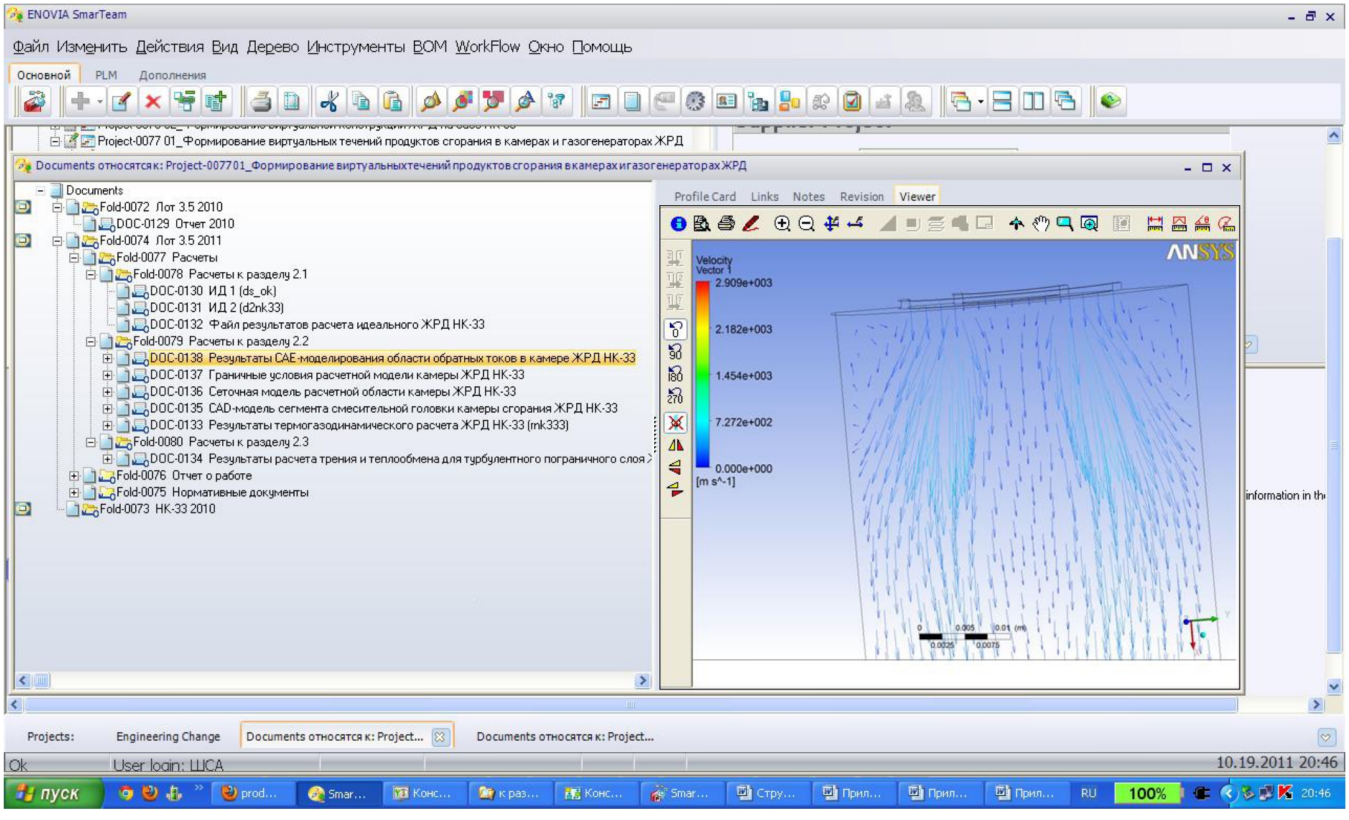

Рисунок 4.28 – Результаты CAE-моделирования области обратных токов в камере ЖРД НК-33

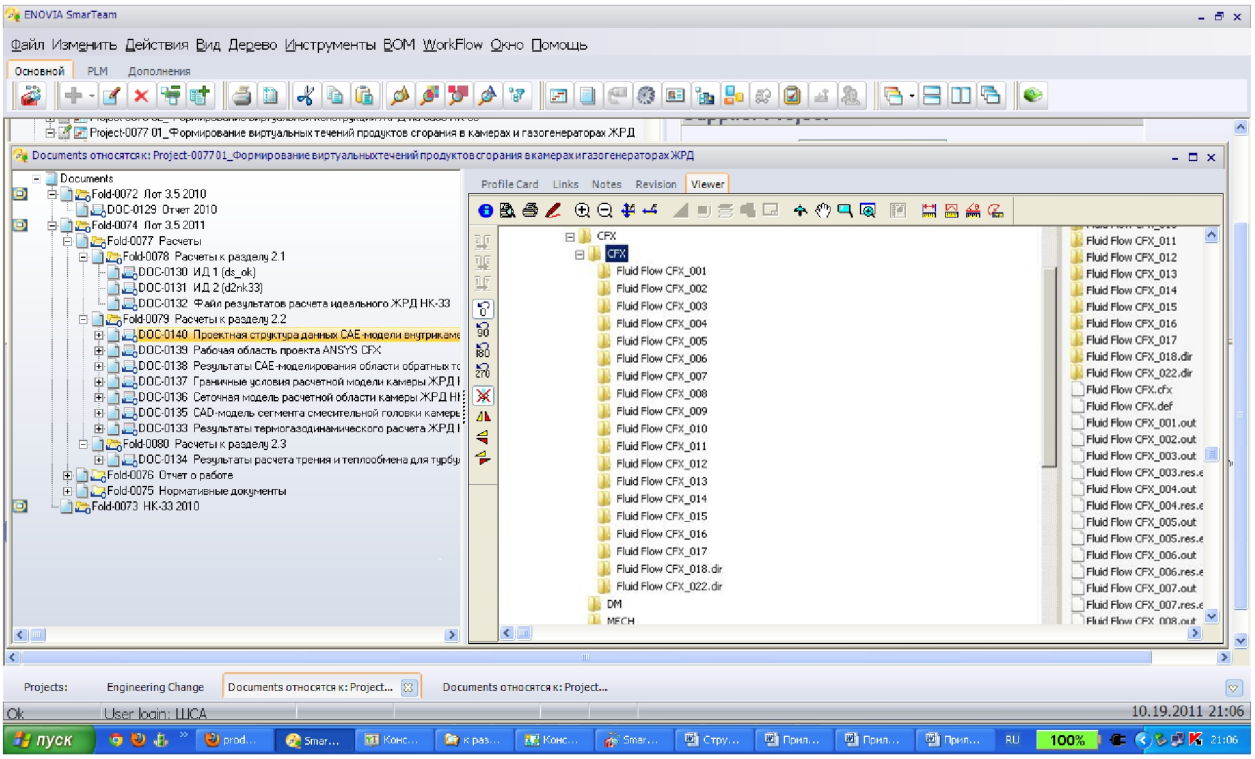

Рисунок 4.29 – – Проектная структура данных CAE-модели внутрикамерных рабочих процессов

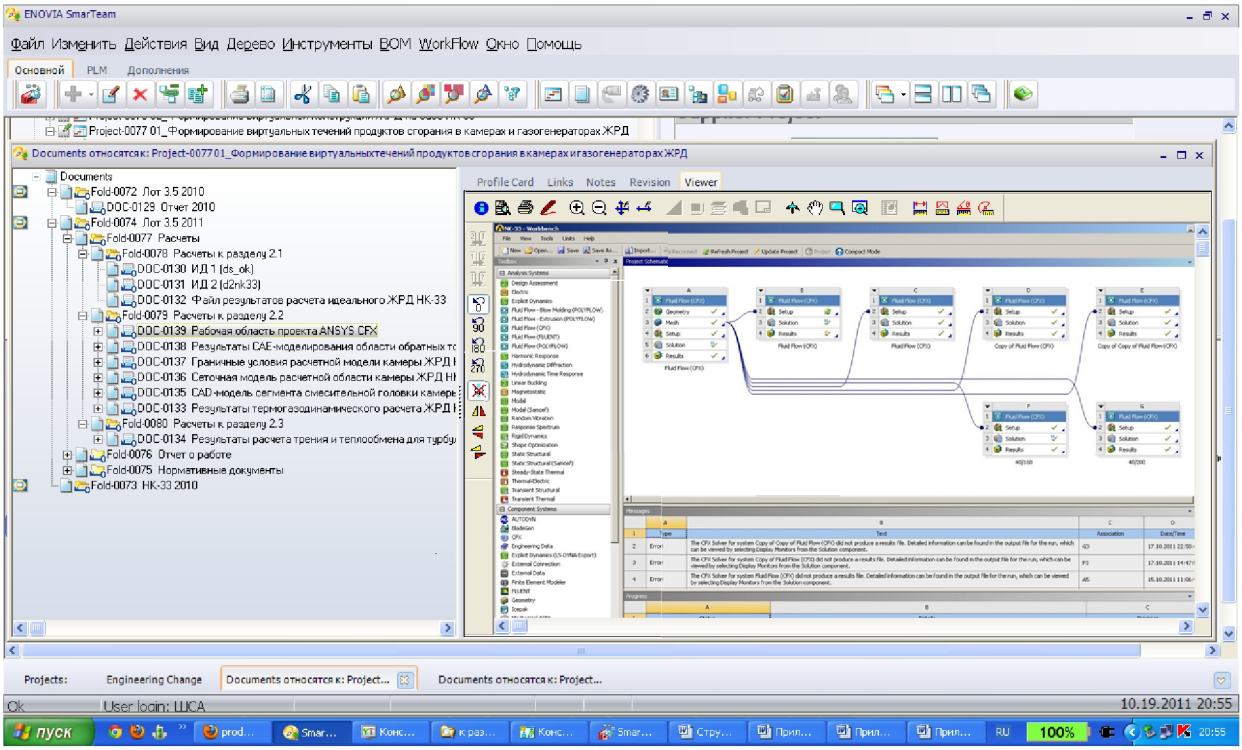

Рисунок 4.30 – Рабочая область проекта ANSYS CFX

При организации процесса проектирования электронный документооборот связывается с документами формата CAE/CAD-систем. Эти документы аналогичным образом (как описано ранее) используются участниками процесса потока работ.

На рисунках показаны результаты структурного синтеза применительно к сегменту камеры сгорания ЖРД НК – 33 в виде CAD-модели, полученной с помощью программного пакета Компас и импортированного в среду ANSYS CFX для создания в ней расчетной модели. На рисунках показаны результаты газодинамического расчета с помощью созданной расчетной модели.

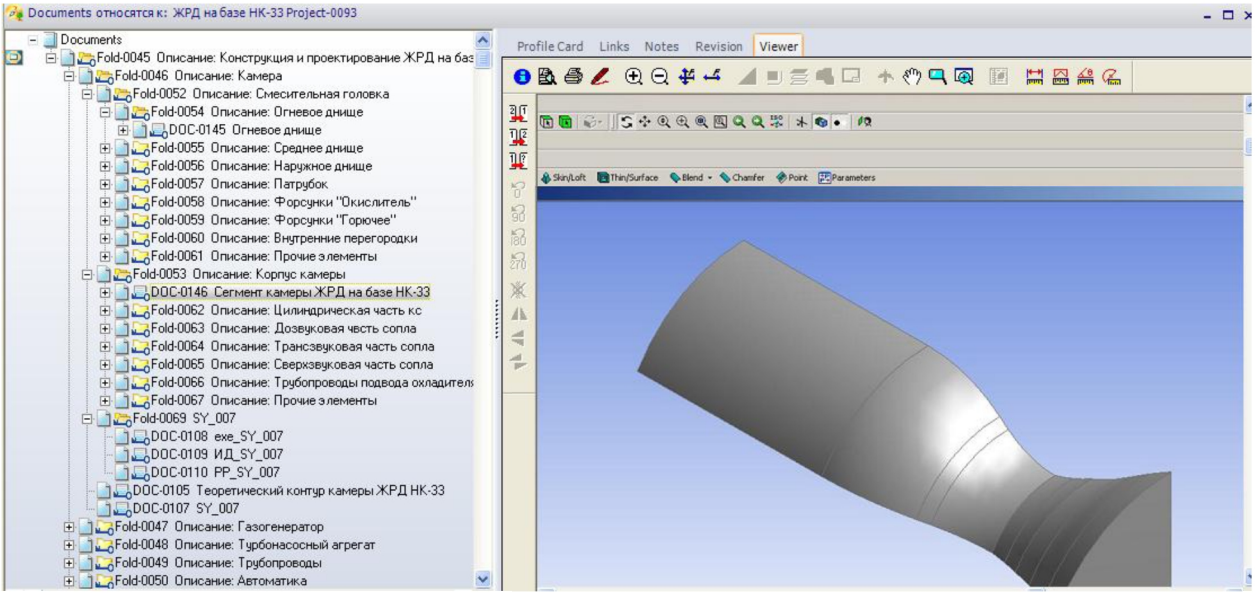

Рисунок 4.31 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (расчетная область, вид со стороны сопла)

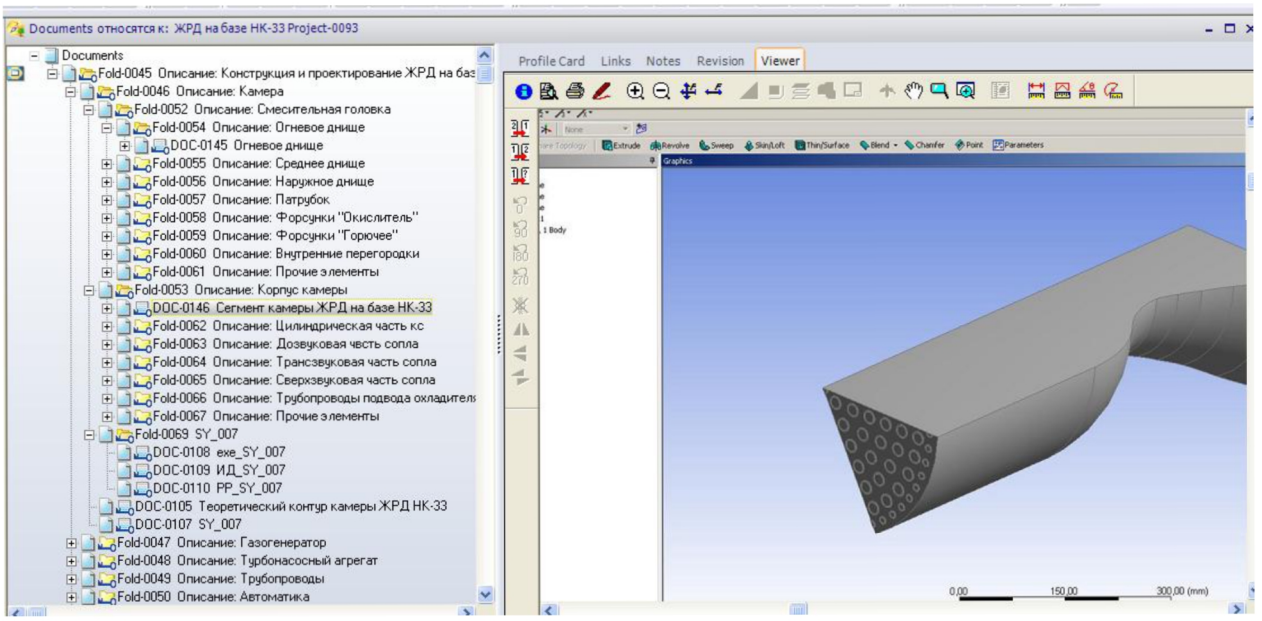

Рисунок 4.32 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (расчетная область, вид со стороны смесительной головки)

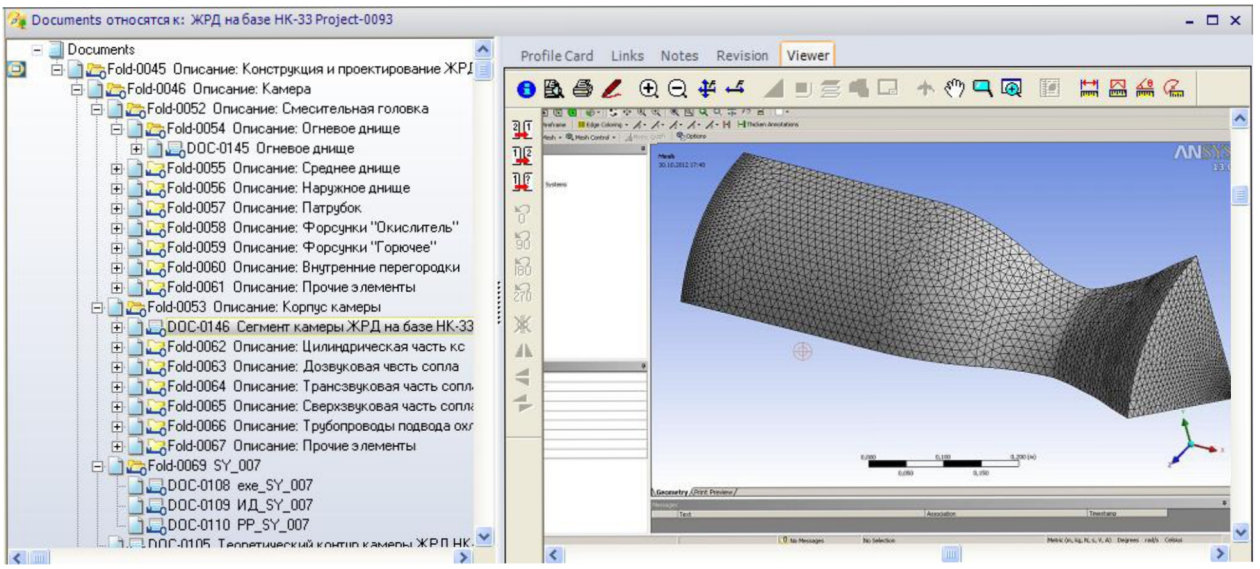

Рисунок 4.33 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (сеточная модель расчетной области, вид со стороны сопла)

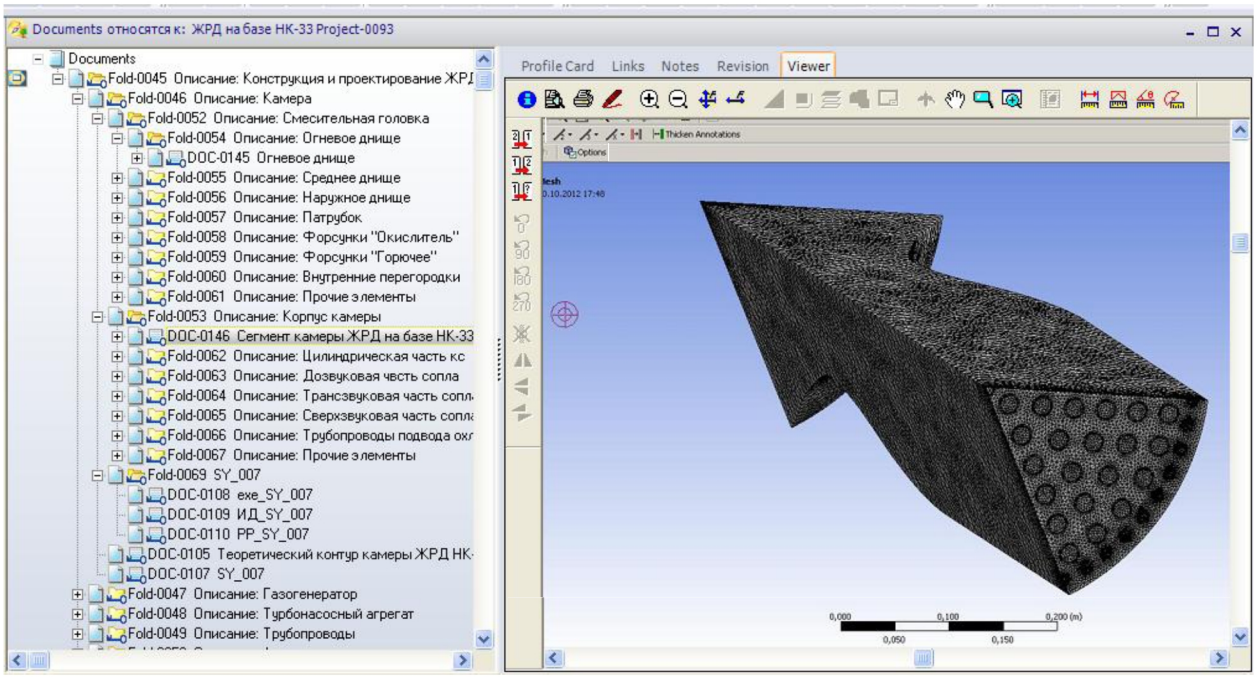

Рисунок 4.34 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (сеточная модель расчетной области, вид со стороны смесительной головки)

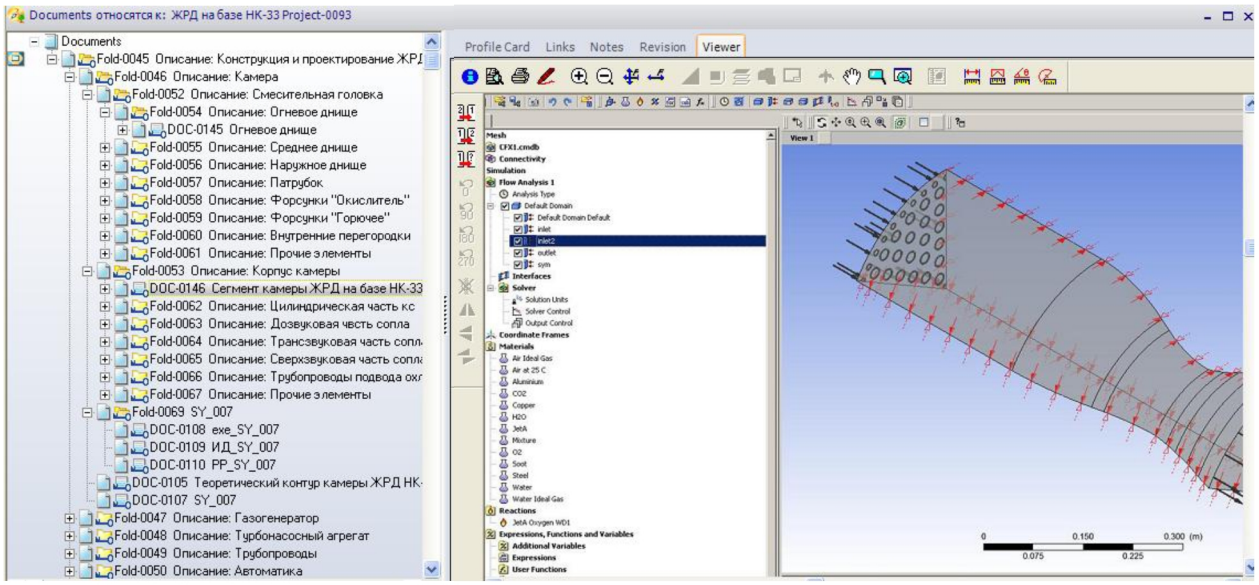

Рисунок 4.35 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (модель граничных условий расчетной области, вид со стороны смесительной головки)

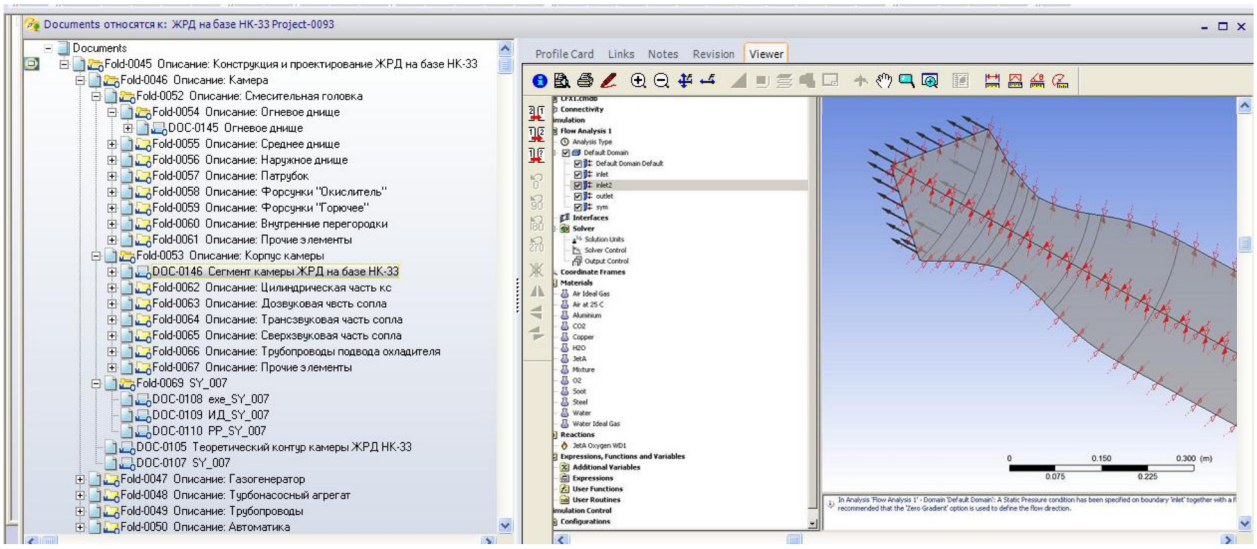

Рисунок 4.36 – Фрагмент расчетной модели сегмента камеры ЖРД НК-33 (модель граничных условий расчетной области, вид со стороны сопла)

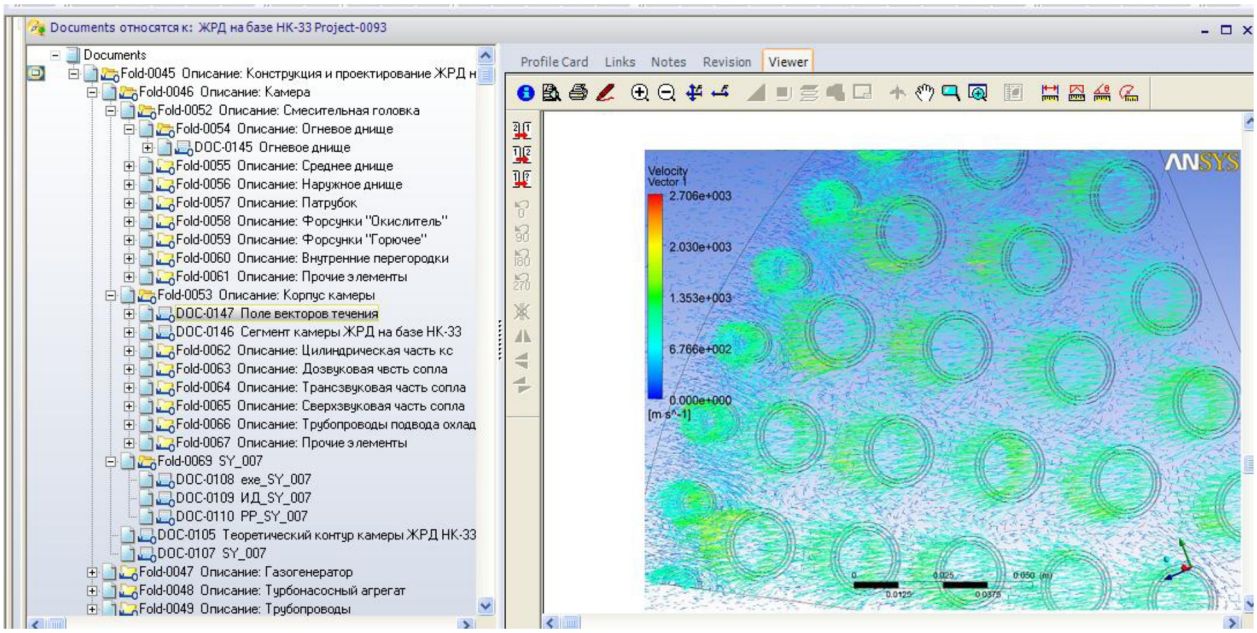

Рисунок 4.37 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле векторов течения в пристенной зоне сегмента камеры сгорания

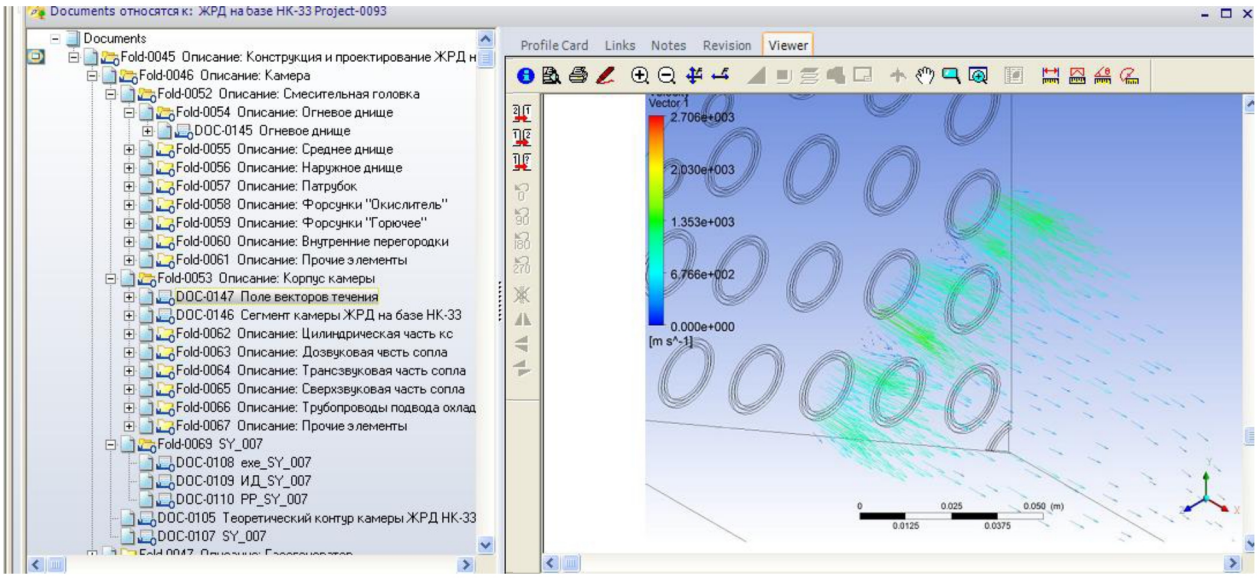

Рисунок 4.38 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле векторов течения в приосевой зоне сегмента камеры сгорания

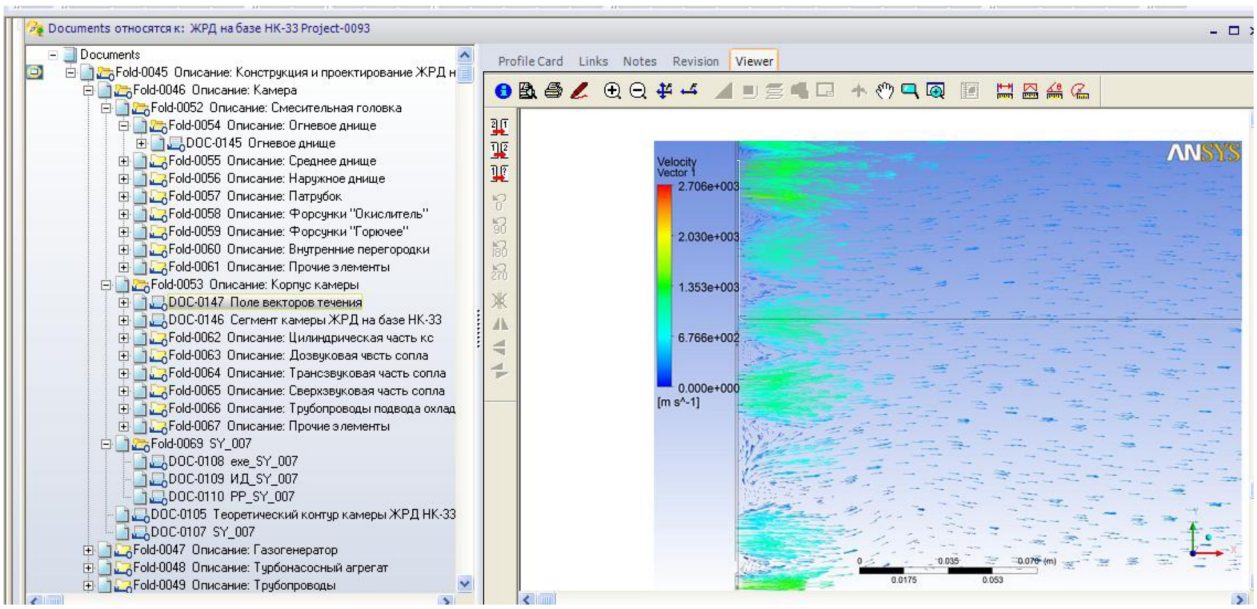

Рисунок 4.39 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле векторов течения» в зоне обратных токов сегмента камеры сгорания

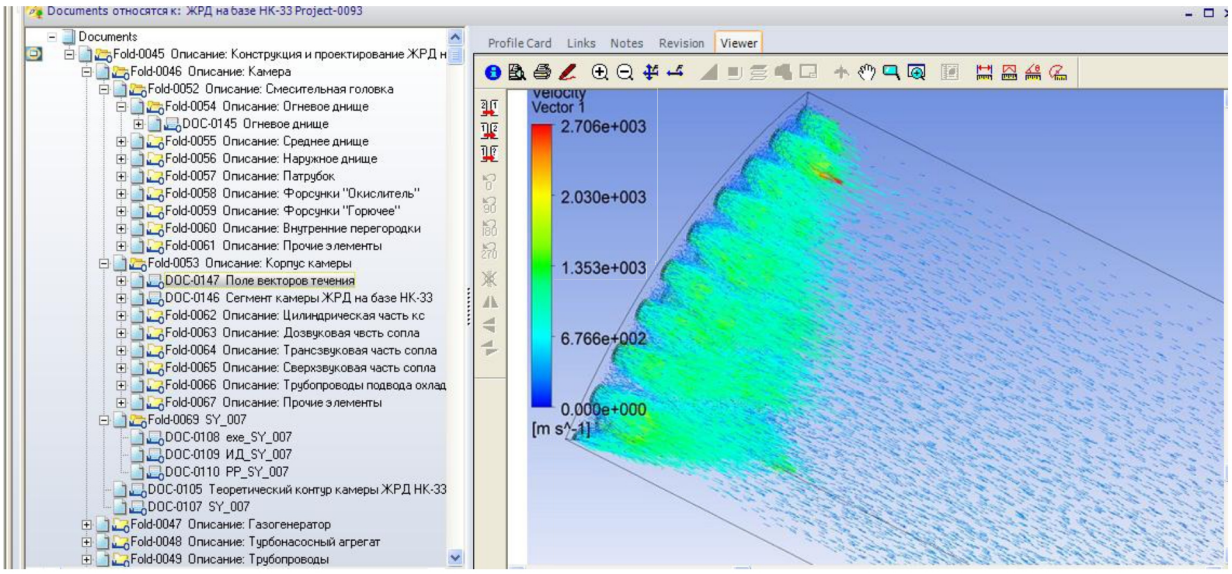

Рисунок 4.40 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле векторов течения» в области, примыкающей к смесительной головки сегмента камеры сгорания

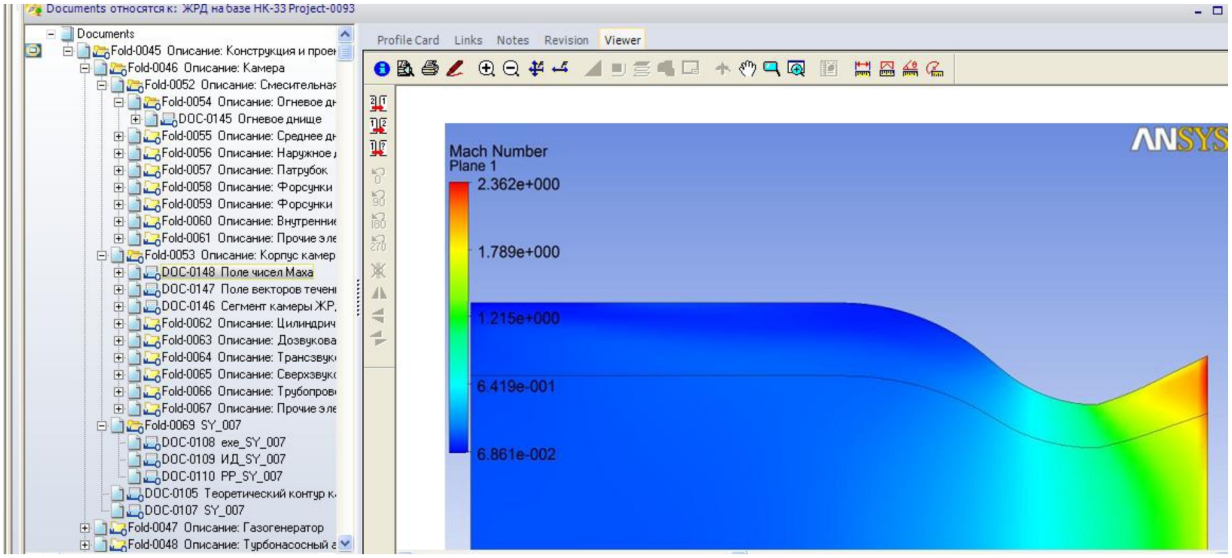

Рисунок 4.41 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле чисел Маха» в меридиональной плоскости сегмента камеры сгорания

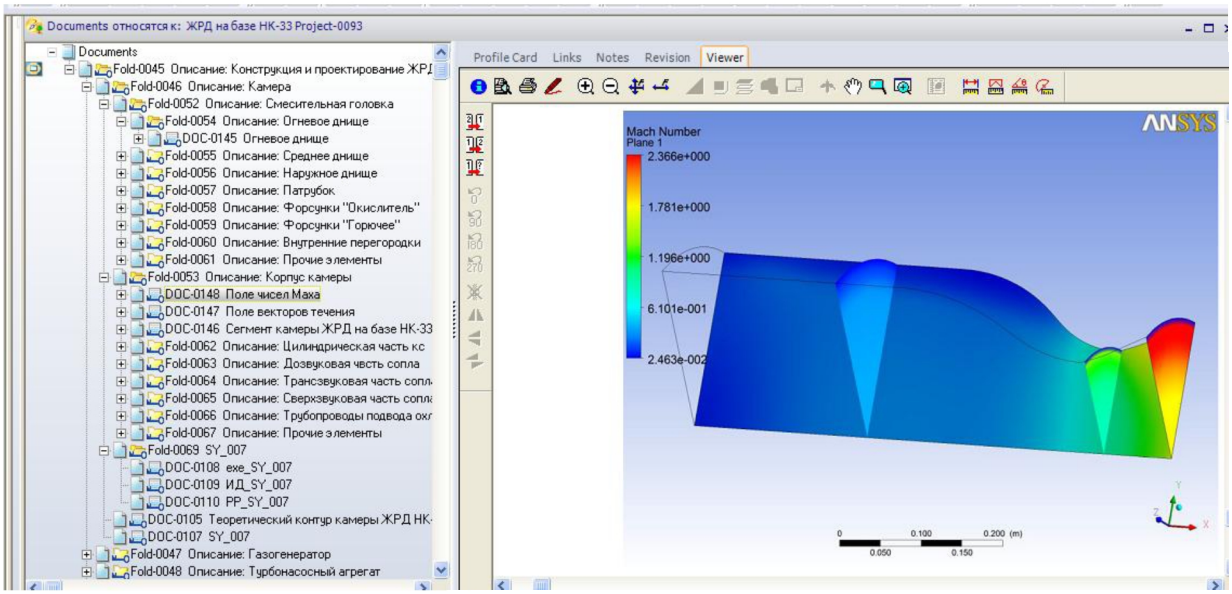

Рисунок 4.42 – Результаты расчетов в среде ANSYS CFX – объект «Поле чисел Маха» в осевом и радиальном направлении сегмента камеры сгорания

Выполнение процессов, регламентированных в PDM-системе в виде потоков работ (Workflow), позволяет создавать рациональную структуру объектов, используемых только в выданном задании. Не востребованные объекты в дерево объектов не привлекаются.

Перечень использованных источников

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования [Текст] / М.В. Добровольский – М.: Машиностроение, 2005. – 488 с.

2. Уманский, С.П. Ракеты-носители. Космодромы [Текст] / С.П.Уманский , под ред. Ю.Н.Коптева // М.: Изд-во «Рестарт+». 2001-216 с.

3. ГОСТ 17655-72. ДВИГАТЕЛИ РАКЕТНЫЕ ЖИДКОСТНЫЕ. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 47 с.

4. ГОСТ 22396-77. ДВИГАТЕЛИ РАКЕТНЫЕ ЖИДКОСТНЫЕ МАЛОЙ ТЯГИ. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 17 с.

5. Гахун Г.Г. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Г.Г. Гахун [и др] . Учебник для для вузов. // М.: Машиностроение, 1989.-424 с.

6. Норенков , И.П. Системы автоматизированного проектирования [Текст] / И.П. Норенков . Учеб. пособие для втузов : В 9 кн . Кн. 1. Принципы построения и структура // М.: Высш. шк. , 1986.-127с

7 . Норенков , И.П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] / И.П. Норенков . Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002.-336 с.

8. 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.

9. Лебединский, Е.В. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Е.В. Лебединский [и др.] , под.ред. акад. РАН А.С. Коротеева // М.: Машиностроение, 2009.-376 с.

10. Руднев, В.И. Формирование технических объектов на основе системного анализа [Текст] / В.И. Руднев [и др.] // М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

11. Дружинин, В.В., Конторов Д.С. Системотехника [Текст] / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов // М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.

12. Павленко А.И. Системный анализ в задачах проектирования АСУ [Текст] / А.И. Павленко . Учебное пособие // М.: Изд-во МАИ,1982 г.-75 с

13. Брусов, В.С. Системный анализ и автоматизированное проектирование летательных аппаратов [Текст] / В.С. Брусов. Учебное пособие // М.: Изд-во МАИ,1982 г.- 80 с.

14. Белоусов, А.И. Концептуальные вопросы проектирования конструктивных схем турбонасосных агрегатов двигателей летательных аппаратов [Текст] / А.И. Белоусов // «Онтология проектирования» , научный журнал, Самара, 2012.- № 3, с.24-37

15. ГОСТ 2.102-68. Виды и комплектность конструкторских документов.Москва, 2002г.

16. ГОСТ 2.103-68. Стадии разработки. . Москва, 2002г.

17. http://ru.wikipedia.org/wiki/Техническое_задание

18 ГОСТ 19.201-78. Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению

19. ГОСТ 34.602-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы

20. ГОСТ 25.123-82. Машины вычислительные и системы обработки данных. Техническое задание. Порядок построения, изложения и оформления

21. Якокка Л. Карьера менеджера. — Мн: Попурри, 2006. — 544 с

22. ГОСТ 2.118-73. Технические предложения .. Москва, 2002г.

23. ГОСТ 2.119-73 . Эскизный проект . Москва, 2002г.

24. ГОСТ 2.120- 68 . Технический проект .. Москва, 2002г.

25 Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение /Гл.ред. А.Г.Братухин . М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008.-608 с .

26. ГОСТ 2.051-2006. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения.

27. ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения.

28. ГОСТ 2.053-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия . Общие положения.

29. Теория выбора и принятия решений : Учебное пособие.- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.- 328 с.

30. Баулин В.И. О табличной форме описания алгоритма выбора конструктивных схем двигателя и его составных частей при автоматизированном

проектировании // Сб.: Автоматизированное проектирование двигателей летательных аппаратов. - М.: МАИ, 1979. - Вып. 464. - С. 85 - 88.

31. Баулин В.И., Зверев К.С. О формализации автоматизированного выбора конструктивной схемы ТНА // Сб.: Автоматизированное проектирование двигателей летательных аппаратов. - М.: МАИ, 1979. - Вып. 464. -С. 88-93.

32. Кораблин М.А., Минаков И.А. Эволюционные алгоритмы в имитационном моделировании //Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды международной конференции. - Самара: СНЦ РАН, 1999. - С. 45 - 50.

33. Баулин В.И., Краев М.В. Конструкция и проектирование турбонасосных агрегатов: Учебное пособие. - М.: МАИ; Красноярск: завод-втуз КПИ, 1985. - 188 с.

34 Зрелов В.А., Проданов М.Е., Кривошеев И.А., Карпов А.В., Сапожников А.Ю. Изучение конструктивно-силовых схем авиационных ГТД: Метод, указания. - Уфа: УГАТУ, 2004. - 28 с.

35. Сапожников А.Ю. Применение генетических алгоритмов для выбора конструктивно-силовой схемы авиационного ГТД //Тезисы докладов 3-й научно-технической конференции молодых специалистов и инженеров, 11-14 июля 2007 г. - Уфа: ОАО «УМПО», 2007. - С. 120.

36. Белоусов А.И., Зрелов В.А., Миронов А.С. Конструктивно-силовые схемы турбовальных ГТД // Ракетно-космическая техника и технология: Тр. Российской науч.-техн.конф. - Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009. -С. 12-18.

37. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М.: Сов. Радио, 1979. - 184 с.

38. ГОСТ 27002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27002-89. - М.: Изд-во ст-тов, 1990.

39. Н.В. Безменова, М.Е.Проданов, М.В. Силютин, С.А.Шустов. Разработка технических предложений по электронной модели ЖРД на базе НК-33 и компьютерная реализация термогазодинамического расчета ЖРД НК-33 // Научно-технический отчет, Самара, СГАУ, 2010 г, 130 с.

40. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей. [Текст]: учебник для ВУЗов / Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф.,Тишин А.Л.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.

41. 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.

42. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. — 480 с.

43. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. – М.: Машиностроение, 1975. – 645 с.

44. Куценко Ю.Г. Влияние состава продуктов сгорания на радиационное охлаждение зоны горения в камере сгорания ГДТ при сжигании метана.// Изв. вузов. Авиационная техника. – 1999. – №4. – С. 83-85.

45. Чванов, В.К. Многодисциплинарное исследование одноступенчатой околозвуковой турбины ЖРД [Текст] / В.К.Чванов, Л.Е.Стернин, А.С.Киселев [и др.] // «Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 14, 2010 г.- с.2…7.

46. Морозов, И. И. Оценка возможностей ANSYS CFX для расчета параметров течения рабочего тела в сопле ЖРД [Текст] / И.И. Морозов // «Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 14, 2010 г.- с.24…28.

47. Bucchieri, L. Использование mode-FRONTIER для оптимизации конструкции авиационной камеры сгорания в рамках проекта NEWAC [Текст] / L. Bucchieri // «Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 8, 2008 г.- с.2…10.

48. Гончарова Н.А., Сербин С.И. Применение программного комплекса ANSYS для решения задач комплексного проектировочного расчета камер сгорания ГТД [Текст] / Н.А Гончарова , С.И. Сербин // Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 15, 2011 г.- с.49…53

49. Хитров, Денис. Моделирование процессов горения, тепло и массообмена в топках котлов на пылевидном топливе [Текст] / Денис Хитров // Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 9, 2008 г.- с.25…28

50. Серант, Ф.А., Фомичев, А.С. Исследование нетрадиционных котлов с кольцевой топкой с помощью программы ANSYS Fluent [Текст] / Ф.А. Серант, А.С. Фомичев // Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 17, 2012 г.- с.45…48

51. Schick, Rudolf .Опыт проектирования систем распыла для различных приложений в ANSYS FLUENT [Текст] / Rudolf Schick// Ansys Advantage. Русская редакция». Инженерно-технический журнал . Москва, № 12, 2009 г.- с.31…33

52. Безменова Н.В., Шустов С.А. Численное моделирование внутрикамерных процессов жидкостных ракетных двигателей на базе НК-33 с использованием CAE/PDM-систем [Текст] : Н.В.Безменова, С.А.Шустов [и др]. Учебное пособие // Самара, СГАУ, 2011. – 78 с.

53. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст]: Справочник в 10 томах / под ред. акад. Глушко В.П. Том 2. – М.: ВИНИТИ АН СССР, 1972. – 489 с.

54. Буч, Гради . Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C^{++} [Текст] / Гради Буч . 2-ое изд.// Пер. с англ. .- М.: «Издательство Бином», СПб: «Невский диалект» , 1999 г.- 560 с.