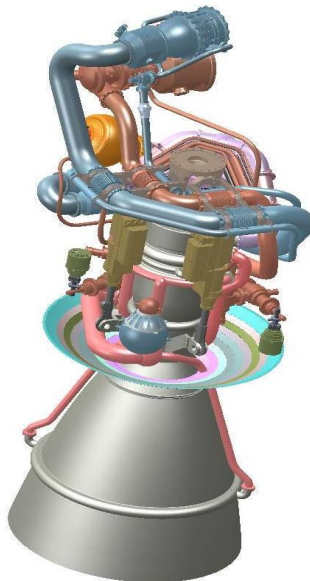


**А.В. Иванов
Г.И. Скоморохов Д.П. Шматов**

**КОНСТРУИРОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ:
ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Учебное пособие



Воронеж 2016

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический
университет»

А.В. Иванов
Г.И. Скоморохов Д.П. Шматов

КОНСТРУИРОВАНИЕ
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ:
ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2016

УДК 621.454.2.018 (075.08)

Иванов А.В. Конструирование жидкостных ракетных двигателей: дипломное проектирование: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (1,3 Мб) / А.В. Иванов, Г.И. Скоморохов, Д.П. Шматов. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

Учебное пособие содержит общие требования к преддипломной практике, содержанию и объему дипломного проекта, основные правила оформления пояснительной записки, пример расчёта и конструирования ЖРД.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».

Табл. 28. Ил. 16. Библиогр.: 8 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. В.С. Рачук

Рецензенты: ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики» (г. Воронеж)
(начальник отдела 116 Ю.В. Демьяненко);
д-р техн. наук, проф. А.В. Кретинин

© Иванов А.В., Скоморохов Г.И.,
Шматов Д.П., 2016

© Оформление. ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
технический университет», 2016

Введение

Преддипломная практика и дипломное проектирование - заключительный этап обучения студента в вузе.

Преддипломная практика является важным этапом в подготовке специалистов по направлению 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», профиль подготовки (специализация) - «Проектирование жидкостных ракетных двигателей».

Преддипломная практика проводится как производственная для сбора данных для выпускной квалификационной работы. Практика является неотъемлемой частью учебного процесса, и представляют собой систему теоретического и производственного обучения непосредственно на базовом предприятии под руководством ведущих специалистов в ракетной технике.

Практика проводится в конструкторско-технологических, расчетных и испытательных отделах базового предприятия. В процессе прохождения практики каждый студент выполняет индивидуальное задание. Последовательность прохождения практики и время проведения лекций и экскурсий определяется календарным планом, который согласовывается с отделом технического обучения.

Особенностью преддипломной практики является сбор материалов для выполнения дипломного проекта. Преддипломная практика проводится в семестре *B* в течении 4-х недель на базовых промышленных предприятиях.

В период прохождения практики студенты руководствуются программой, утвержденным календарным планом, индивидуальным заданием, регулярно и аккуратно заполняют дневник практики и периодически представляют его на проверку своим руководителям.

Дипломный проект (работа) - это квалификационная работа студента, представляющая собой самостоятельное за-

конченное решение актуальной научно-технической (конструкторской, технологической, исследовательской) проблемы. На основе материалов дипломного проекта, доклада студента на защите, ответов на вопросы, отзыва руководителя дипломника и рецензии на дипломный проект государственная аттестационная комиссия (ГАК) решает вопрос о присвоении студенту квалификации инженера. Учитывая также академическую успеваемость студента, ГАК дает рекомендацию по возможному продолжению образования в аспирантуре.

Основная задача дипломного проектирования состоит в том, чтобы на заключительном этапе обучения студент показал умение творчески мыслить, принимать и разрабатывать оригинальные инженерные решения на всех этапах проекта.

Каждый дипломный проект должен содержать новизну и оригинальность принятых решений. За принятые при проектировании решения и правильность всех данных и результатов отвечает студент - автор дипломного проекта.

Учебное пособие содержит требования к выполнению задания по преддипломной практике, содержанию и объему дипломного проекта, основные правила оформления пояснительной записки, пример расчёта и конструирования ЖРД.

Издание соответствует требованиям ФГОС ВО по направлению подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», предназначено для студентов-дипломников Института машиностроения и авиационной техники, специализация «Проектирование жидкостных ракетных двигателей».

1 Преддипломная практика

1.1 Цель преддипломной практики

Непосредственно работа студента над дипломным проектом начинается на преддипломной практике. Студент перед направлением на преддипломную практику получает индивидуальное задание, которое утверждается заведующим кафедрой. В задании указывается тема проекта (работы) и круг вопросов, которые должны быть решены в ходе прохождения практики. Каждый студент обязан внимательно изучить индивидуальное задание и программу преддипломной практики, задание и методические указания по дипломному проектированию, чтобы в дальнейшем руководствоваться этими документами. Он должен наметить план работы (вначале предварительный, а затем утвержденный) и уточнить с руководителями практики и дипломного проектирования материалы, подлежащие изучению и разработке во время преддипломной практики.

Главными задачами практики являются разработка технического задания и технического предложения, подбор и анализ материалов по теме дипломного проекта. Студенты знакомятся с отечественной и зарубежной литературой (учебники, учебные пособия, монографии, периодическая литература, научные труды и т.д.) и с материалами предприятия по своей теме. Особое внимание обращается на анализ существующих методик и методов исследования, оценку их адекватности поставленной задаче исследований с учетом их достоинств и недостатков и уровня технического совершенства. При подборе и анализе материалов необходимо определить и наметить то новое, что будет разрабатываться в проекте. Каждый дипломный проект должен содержать оригинальные решения.

На основе выполненной работы и анализа собранных материалов уточняется тема дипломного проекта, совместно с

руководителем проекта разрабатывается и выдается студенту задание на выполнение проекта, утвержденное заведующим кафедрой, и составляется график его выполнения.

По окончании преддипломной практики студент оформляет отчет в соответствии с индивидуальным заданием и программой практики. Отчет должен содержать индивидуальное задание на практику, сведения о конкретно выполненной работе, разделы по индивидуальному заданию и программе практики, справку по анализу собранных материалов по теме дипломного проекта, техническое задание и техническое предложение по теме дипломного проекта, выводы и предложения по уточнению темы проекта. Отчеты представляются в установленные сроки на кафедру.

Техническое задание и техническое предложение входят в объем дипломного проекта и выносятся на защиту.

Отчет подписывается руководителем практики от предприятия и сдается на кафедру. К отчету прикладывается отзыв о работе студента, составленный руководителем практики от предприятия. В нем содержатся данные о выполнении программы практики и индивидуального задания, качестве работы студента, выполнении правил внутреннего трудового распорядка, об отношении к работе и объеме и качестве собранного материала.

По окончании практики студент сдает зачет (защищает отчет) с оценкой руководителя практики от кафедры. При этом принимается во внимание характеристика, данная руководителем практики от предприятия. Сразу после сдачи зачета студент получает задание на дипломное проектирование, подготовленное и оформленное руководителем проекта от кафедры. В нем указываются срок сдачи выполненного проекта на рецензию и на кафедру, обязательные расчеты, чертежи и схемы(и их количество в листах формата А1) разрабатываемого изделия и другие вопросы.

Целями преддипломной практики являются:

- закрепление и углубление теоретических знаний, полученных студентами при изучении базовых дисциплин;

- получение навыков, предусмотренных требованиями к подготовке специалистов по направлению «Проектирование жидкостных ракетных двигателей», в процессе проектирования, изготовления и автономной отработки жидкостных ракетных двигателей (ЖРД);

- выработка у студента умения разбираться в технической и справочной литературе, анализировать достижения отечественной и зарубежной техники по заданной теме;

- обобщать положительный опыт промышленности и учиться принимать технически и экономически обоснованные решения по всем разрабатываемым разделам дипломного проекта;

- формирование основ научного мышления, в том числе: понимание границ применимости технических понятий, умение оценивать степень достоверности результатов теоретических и экспериментальных исследований;

- сбор практического материала и подготовка к дипломному проектированию;

- разработка технического задания и технического предложения по теме дипломного проекта.

Для достижения цели ставятся задачи по изучению:

- используемых на предприятии типовых конструкторских решений, технологических процессов, специализированного программного обеспечения для проектирования и моделирования ЖРД и ЭУ;

- структуры и производственного процесса предприятия;

- технологических процессов, входящих в производственный цикл;

- основ организации и планирования производства; техники безопасности и охраны труда на предприятии.

1.2 Структура и содержание преддипломной практики

Организационное собрание. Знакомство с графиком проведения практики.

Получение и согласование индивидуального задания на практику с руководителями практики от кафедры и базового предприятия.

Ознакомление с основными вопросами практики. Постановка задачи, составление индивидуального плана работы.

Посещение тематических лекций и экскурсий.

Сбор материала для выполнения выпускной квалификационной работы посредством изучения технической и справочной документации и консультаций со специалистами предприятия.

Изучение используемых на предприятии типовых конструкторских решений, технологических процессов, специализированного программного обеспечения для проектирования и моделирования ЖРД. Анализ подходов к выбору топливных компонентов, давления в камере сгорания, термодинамическим расчетам сгорания и истечения, проектированию схемы и расчету основных параметров двигателя, камеры сгорания и сопла, турбонасосного агрегата, газогенератора, агрегатов регулирования и управления, магистралей. Формулировка выводов о возможности их применения в выпускной квалификационной работе.

Проведение патентно-информационного поиска в библиотеках предприятия, вуза, города, глобальной сети Internet.

Детальное изучение вопросов, непосредственно связанных с объектом проектирования или процессом.

Участие в процессах математического моделирования, конструирования, проектирования и испытания разрабатываемых устройств или технологического процесса.

Формирование набора данных для технико-экономического обоснования эффективности разрабатываемых устройств.

мой двигательной или энергетической установки, расчета себестоимости, оценки капвложений. Изучение вопросов организации производственных процессов непосредственно связанных с проектируемым объектом.

Изучение вопросов обеспечения безопасности жизнедеятельности, экологической чистоты, защиты интеллектуальной собственности.

Сравнительный анализ возможных вариантов реализации объекта проектирования, формирование инвариантных технических решений.

Оформление комплекта документов на выпускную квалификационную работу.

Подготовка к Государственному экзамену по специальности. Подготовка и оформление отчета по преддипломной практике (разработка эскизного проекта).

Самостоятельная работа студента (СРС) включает:

Сбор материала для выполнения выпускной квалификационной работы;

Изучение используемых на предприятии типовых конструкторских решений, технологических процессов. Проведение патентно-информационного поиска в библиотеках предприятия, вуза, города, глобальной сети Internet;

Формирование набора данных для технико-экономического обоснования эффективности разрабатываемой двигательной установки, расчета себестоимости, оценки капвложений;

Изучение вопросов обеспечения безопасности жизнедеятельности, экологической чистоты, защиты интеллектуальной собственности;

Сравнительный анализ возможных вариантов реализации объекта проектирования;

Оформление комплекта документов на выпускную квалификационную работу.

2 Дипломное проектирование

2.1 Выбор темы

Дипломный проект выполняется на основе всего комплекса знаний, полученных студентами за время обучения в университете, и глубокого изучения материалов и литературы по специальности (учебников, монографий, периодической литературы, нормативных документов и т.п.).

Темы дипломных проектов должны быть актуальными и практически значимыми. При выборе темы учитываются наклонности и способности студента. Направление исследований, тематика научных исследований определяются, как правило, на четвёртом курсе при распределении студентов на НИРС. Перечень тем и направлений исследований соответствует тематике научной группы, в работе которой студент принимает участие. Студент может предложить свою тему с обоснованием ее актуальности и целесообразности разработки.

К общим задачам дипломного проектирования относятся следующие:

- анализ технического задания (ТЗ) на проектирование;
- выявление основных проблем, решение которых имеет решающее значение для выполнения проекта;
- обзор литературы и предшествующих работ по теме проекта и смежным проблемам;
- поиск и анализ известных теоретических, конструктивных, технологических решений;
- теоретическое и экспериментальное исследование, подтверждающее правильность выбранного решения, в том числе математическое и имитационное моделирование проектируемой системы;
- выбор и обоснование наилучшего (наиболее рационального) научно-технического решения (принципиальной схемы, метода расчета);

- конструирование и выполнение расчетов, подтверждающих выполнение требований ТЗ;
- технико-экономический анализ;
- поиск и обоснование решений, связанных с экологией и охраной труда;

Каждый дипломный проект должен содержать новизну и оригинальность принятых решений. За принятые при проектировании решения и правильность всех данных и результатов отвечает студент - автор дипломного проекта.

Преемственный характер организации работы над темой проекта позволяет выполнить более глубокую проработку темы, выполнить необходимые исследования и эксперименты, создать макетный образец.

По такому алгоритму работа над проектом проводится как на предприятии, так и в ВГТУ. Объем материала, выносимого на защиту дипломного проекта, определяется в ходе преддипломной практики и по ее результатам.

При выборе тематики учитываются способности, склонности и возможности студента. Техническое задание при сквозном проектировании может корректироваться по результатам предыдущего этапа.

В процессе работы над темой, начиная с 4-го курса, студент выполняет патентно-информационный поиск и составляет библиографию.

При этом в обязательном порядке выполняется обзор патентов и литературы (в том числе периодических изданий) стран, которые являются лидерами в этой области науки и техники.

Существенную помощь в поиске патентной информации, документации фирм разработчиков, литературы и периодических изданий оказывает Интернет. В данный момент из локальной сети ВГТУ имеется доступ практически ко всем отечественным и зарубежным информационным ресурсам. В распоряжении студентов имеется кафедральный ВЦ.

В работе над проектами используется опыт исследований и проектирования предприятий, на которых студент проходит практики или выполняет проект. При наличии отечественных или импортных прототипов выполняется их анализ, выявляются их сильные и слабые стороны и, исходя из этого, формируется задача исследований и проектирования. Если прототип отсутствует, выявляются тенденции развития, характерные для данной области науки и техники, а также смежных отраслей и, на их основе, формируется направление исследований и задачи проектирования.

В ходе выполнения курсовых проектов и НИР на предшествующих курсах обучения студент решает отдельные проблемы, связанные с тематикой и направлением дипломного проекта (работы).

2.2 Структура, содержание и объём

В каждом дипломном проекте должна быть разработана основная тема в соответствии с планом, одобренным кафедрой, а также отдельные современные и перспективные теоретические и практические вопросы. Студент может по рекомендации кафедры дополнительно представить краткое содержание дипломного проекта на одном из иностранных языков, которое оглашается на защите и может сопровождаться вопросами к студенту на этом языке.

В сроки, установленные кафедрой, студенты периодически отчитываются о степени готовности проекта. Законченный дипломный проект, подписанный студентом и консультантами, представляется руководителю. После просмотра и одобрения руководитель подписывает его и вместе со своим отзывом представляет заведующему кафедрой.

Заведующий кафедрой на основании этих материалов решает вопрос о допуске студента к защите, делая соответствующую запись на титульном листе пояснительной записки.

Дипломный проект, допущенный выпускающей кафедрой к защите, направляется на рецензию.

Рецензию дипломных проектов выполняют, как правило, наиболее квалифицированные сотрудники предприятий и организаций, работающих по тематике близкой к теме дипломного проекта (работы).

Процесс создания реальных изделий начинается с технического задания (ТЗ) на вновь разрабатываемое или модернизируемое изделие. Техническое задание на проект (работу) разрабатывается в соответствии с требованиями государственных стандартов (ГОСТ В15.201-2001). Оно устанавливает назначение, технические характеристики, стадии разработки, показатели качества, состав изделия и специальные требования к нему.

Техническое задание оформляется в соответствии с общими требованиями к текстовым документам по СТП ВГТУ 004-2003 на листах формата А4 без рамки, основной надписи и дополнительных граф к ней. Техническое задание на выполнение дипломного проекта (работы) должно состоять из разделов, располагаемых в следующем порядке.

- 1) Наименование проекта (работы) и основание для его разработки.
- 2) Цель и назначение разработки.
- 3) Перечень, решаемых в проекте исследовательских задач.
- 4) Требования к конструкции изделия.
- 5) Требования к стандартизации и унификации.
- 6) Технологические требования.
- 7) Технико-экономические показатели.
- 8) Экологические требования и требования по безопасности.
- 9) Требования к обеспечению патентоспособности.
- 10) Метрологические требования.

Техническое задание может быть дополнено приложениями. В зависимости от особенностей разрабатываемого образца, условий его применения и эксплуатации допускается вводить в ТЗ и другие разделы.

Дипломный проект разрабатывается на уровне эскизного проекта. По согласованию с руководителем в ТЗ на изделие, разрабатываемое в дипломном проекте, также могут вводиться другие разделы, а некоторые из них исключаться. В зависимости от направленности дипломного проекта обязательными разделами дипломного проекта являются:

- научно-исследовательская часть;
- расчётно-конструкторская часть;
- технологическая часть;
- специальная часть;
- технико-экономическое обоснование;
- промышленная экология и безопасность.

1) Научно-исследовательская часть.

В научно-исследовательскую часть проекта (работы) обычно включают следующие вопросы:

- анализ заданных в ТЗ тактико-технических и производственно-экономических требований;
- анализ существующих и опытных, отечественных и иностранных ЖРД, близких по назначению к проектируемому;
- анализ научно-технической литературы, периодических изданий, патентов и других источников информации;
- теоретические исследования и анализ известных научно-технических подходов и решений аналогичных по ряду признаков;
- методы и методики математического моделирования системы в целом и ее составных частей;
- анализ вариантов решения, поставленной в ТЗ задачи;
- разработка алгоритмов решения, поставленной в ТЗ задачи;

- теоретические и экспериментальные исследования повышения надежности ЖРД;
- исследования технологических процессов производства;
- практические рекомендации, обеспечивающие реализацию полученных из проведенных исследований выводов;

2) Расчетно-конструкторская часть.

В расчетно-конструкторской части должно быть спроектировано новое изделие либо некоторые его узлы или предложения по модернизации существующего устройства в соответствии с заданными тактико-техническими и производственно-экономическими требованиями.

Расчетно-конструкторская часть в зависимости от темы проекта может включать в себя следующие основные разделы:

- выбор, обоснование и разработка пневмогидравлической схемы ЖРД или её составной части;
- разработку программного обеспечения расчёта изделия (составной части программного комплекса) и конструкторской документации в соответствии с ЕСПД;
- разработку конструкций отдельных узлов;
- расчеты на прочность и устойчивость отдельных узлов и всей конструкции в целом при вибрационном воздействии;
- расчеты безопасности, надежности, точности и эффективности функционирования ЖРД;
- проработку вопросов защиты ЖРД от воздействия внешних климатических факторов и повышения радиационной стойкости конструкции; и ряд других вопросов по согласованию с руководителем проекта (работы) и в соответствии с ТЗ.

3) Технологическая часть.

В технологической части проекта студент, как правило, разрабатывает технологический процесс сборки и изготовления прибора или некоторых его узлов либо процесс регули-

ровки и испытаний, либо автоматическую контрольно-проверочную аппаратуру.

В технологической части проекта могут быть рассмотрены следующие вопросы:

- оценка технологичности конструкции устройства;
 - выбор и анализ различных вариантов технологии изготовления деталей или узлов ЖРД;
 - разработка контрольно-проверочной аппаратуры и тестового оборудования, техпроцесс подтверждения метрологических характеристик, годности и готовности;
 - процессы испытаний изделия или составных частей в натуральных условиях;
 - процессы испытаний изделия в целом или составных его частей в заводских условиях при проверках по;
- и другие вопросы по согласованию с консультантом по технологии и руководителем проекта.

4) Специальная часть проекта содержит детальную инженерно завершенную подробно разработанную часть исследовательской, конструкторской или экспериментальной задачи по проектированию ЖРД и выполняется каждым студентом индивидуально.

Вопросами данной части могут быть: методики расчета (алгоритмизации и составления пакетов прикладных программ) конструирования элементов ЖРД; анализа технических путей улучшения каких-либо его характеристик за счет уточнения проектировочных решений и выбора оптимальных параметров; разработки методики эксперимента и обработки полученных результатов и т.п. Специальная часть включает обзор результатов предшествующих работ в данной области, техническую и математическую постановку задачи, изложение методов решения, представление и анализ результатов, технические выводы. Рекомендуется использование ЭВМ.

Объем ее должен составлять 25-40 % от общего объема проекта. В зависимости от характера специальной части ее сопровождают не менее 1-2 листов чертежей.

5) Техничко-экономическое обоснование.

Экономическому анализу подлежит основной объект задания, т.е. разрабатываемый метод расчета и анализа, алгоритм, конструкция, технологический процесс. В задании предусматривается, в зависимости от характера проекта (работы), рассмотрение следующих вопросов:

- технико-экономическое обоснование разработанной конструкции, узлов изделия или изделия в целом;
- технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы;
- технико-экономическое обоснование спроектированных технологических процессов;
- оценка экономической эффективности изделия в целом или результатов его модернизации;
- расчет трудоемкости, себестоимости, прибыли, оценка окупаемости затрат.

Выполнение этого раздела базируется на экономической подготовке студента в Университете и может дополняться и уточняться о согласованию с консультантом по экономике и руководителем проекта.

6) Промышленная экология и безопасность.

Вопросы промышленной экологии и безопасности в дипломных проектах (работах) рассматриваются в соответствии с выданным заданием на основе существующих ГОСТов, инструкций, положений и регламентов.

Принимаемые проектные решения должны быть направлены на создание изделий безопасных в процессе их изготовления, отработки и эксплуатации, а также на создание безопасных условий труда на всех этапах жизненного цикла.

При разработке конструкторской части дипломного проекта (работы) должен уделить особое внимание выбору и

обоснованию схем и конструкций всех систем изделия, обеспечивающих безопасность на всех этапах жизненного цикла изделия (во всех условиях служебного обращения, длительного хранения и эксплуатации), в том числе внештатных ситуациях. Должны быть проработаны вопросы безопасной утилизации изделия. Все эти вопросы должны быть решены в полном соответствии с заданными тактико-техническими требованиями.

Вопросы охраны труда должны быть тесно увязаны с вопросами обеспечения повышения производительности и облегчения условий труда, для чего необходимо предусматривать всестороннюю механизацию работ, автоматизацию производственных процессов и применение наиболее передовых и прогрессивных схем технологических процессов.

В проекте должны быть даны решения по организации рабочего места:

- размещение основного и вспомогательного оборудования;
- устройство освещения естественного и искусственного, общего и местного, с выбором типов светильников;

- устройство местной вентиляции и обеспечения комфортных условий труда;

- способы удаления вредных веществ и отходов производства
- способы защиты от вредных воздействующих факторов, таких как, электромагнитные и ионизирующие излучения, шум, вибрация и другие.

При выполнении дипломного проекта должны быть даны решения по предупреждению пожаров и пожаротушению: выбор системы и мощности пожарного водопровода, устройство складов горючего, режимы личной безопасности и гигиены труда и т.д.

Конкретно перечень рассматриваемых вопросов в этом разделе определяется консультантом по экологии и отражается в ТЗ на проект (работу).

Объем дипломного проекта (работы). Объем научно-исследовательской, расчетно-конструкторской, технологической, организационно-экономической и экологической частей определяется типом квалификационной работы. Студенту может быть предложен один из вариантов:

- дипломный проект с развитой расчетно-конструкторской частью;
- дипломный проект (работа) с развитой научно-исследовательской или экспериментальной частью.

Дипломный проект и дипломная работа различаются соотношением стандартных разделов (расчетно-конструкторская часть) и исследовательская (теоретическая, аналитическая, экспериментальная) при сохранении их суммарного объема - 70 % по трудоемкости.

Руководитель проекта определяет и контролирует содержание и объем научно-исследовательской, расчетно-конструкторской, технологической и организационно-экономической частей и задание по охране труда. Для детальной же разработки этих вопросов привлекаются консультанты с предприятий, другие специалисты кафедры, консультанты по организации и экономики производства, охраны труда, а также, по мере необходимости, консультанты с других кафедр Университета.

2.3 Оформление дипломного проекта

Дипломный проект оформляется в соответствии с требованиями действующих стандартов (ЕСКД, ЕСПД и т.п.) и регламентов. Весь выполненный объем работы по дипломному проекту оформляется в виде расчетно-пояснительной записки и графических материалов [1].

Расчетно-пояснительная записка объемом от 100 до 150 страниц содержит:

- титульный лист;

- задание на выпускную квалификационную работу;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основную часть (конструкторскую, технологическую, расчетную, исследовательскую);
- заключение;
- список литературы;
- приложения (при необходимости).

Оформленная РПЗ должна соответствовать требованиям СТП ВГТУ 004-2003 (Дипломное проектирование. Оформление расчетно-пояснительной записки и графической части).

Оформленная записка должна начинаться с титульного листа, за которым помещается техническое задание. Титульный лист и задание оформляется на специальных бланках, выдаваемых студенту по завершении преддипломной практики. Затем следует введение и все остальные разделы в перечисленном выше порядке. Завершают пояснительную записку заключение, список литературы и оглавление.

Во введении должна быть показана актуальность работы, каким конкретным вопросам посвящена работа.

Материал в записке целесообразно излагать кратко в порядке логической последовательности.

Общеизвестные формулы, по которым производится расчет того или иного устройства, должны приводиться в пояснительной записке без выводов. Формулы же, полученные самим студентом, даются с последовательными выводами и рассуждениями.

Изложение материала в пояснительной записке должно сопровождаться необходимыми чертежами, схемами и графиками.

В заключении должны быть даны общие выводы по работе и оценка спроектированного ЖРД, устройства или проведенного исследования.

В целом пояснительная записка по структуре и оформлению должна соответствовать ГОСТ7.32-2001.

Титульный лист должен быть подписан дипломником, руководителем проекта и всеми консультантами. Кроме того, консультанты подписывают соответствующие разделы пояснительной записки.

Отзыв руководителя проекта и рецензия в записку не подшиваются.

Объем графических материалов в зависимости от типа проекта представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Объем графических материалов

Наименование разделов	С развитой расчётно-конструкторской частью	Дипломная работа	С развитой научно-исследовательской частью
Плакаты (постановка задачи, результаты расчётов, алгоритмы и т.п.)	1-2 л.	4-5 л.	2-3 л.
Конструкторские чертежи (сборочные, общего вида и т.п.)	4-5 л.	2-3 л.	3-4 л.
Технологические разработки	2-3 л.	1-2 л.	1-2 л.
Схемы (структурные, функциональные, принципиальные),	1-2 л.	1-2 л.	4-5 л.
Организационно экономические разработки	1 л.	1 л.	1 л.

Примечание: 1 л. - 1 лист формата А1. Листы по промышленной экологии и безопасности выполняются при необходимости.

При написании пояснительной записки необходимо соблюдать правила написания текстовых конструкторских документов, изложенные в ГОСТ 2.105-79. Основные правила приводятся ниже.

Текст записки излагают кратко, четко, не допуская различных толкований. Не рекомендуется применять сложные предложения и обороты. При изложении обязательных требо-

ваний в тексте должны применяться слова "должен", "следует", "необходимо" и производные от них.

В тексте не допускается применять:

- для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы);
- обороты разговорной речи;
- техницизмы и профессионализмы;
- иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- индексы стандартов (ГОСТ, ОСТ, РСТ, СТП) без регистрационного номера.

Наименование изделия на титульном листе в основной надписи и при первом упоминании в тексте должно быть одинаковым с наименованием его в основном конструкторском документе.

В последующем тексте порядок слов в наименовании должен быть прямой. Наименования предметов, применяемые в тексте, подрисуночных подписях, таблицах и приложениях должны быть одинаковыми. В наименовании предметов на первом месте должно быть определение (имя прилагательное), а затем название предмета (имя существительное).

Например: жидкостный двигатель, буферный насос...

Сокращение слов в тексте, как правило, не допускается. Исключения составляют общепринятые сокращения в русском языке и установленные соответствующими государственными стандартами.

Содержание дипломного проекта (работы) включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, список литературы, наименование приложений с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы пояснительной записки.

Во введении должна быть дана оценка современного состояния решаемой научно-технической задачи, обоснована

необходимость проведения этой работы, показана актуальность и новизна.

Основная часть дипломного проекта в общем случае может состоять из следующих разделов:

- литературный обзор;
- назначение и область применения проектируемого изделия;
- техническая характеристика;
- описание и обоснование выбранной конструкции;
- расчеты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции;
- методика получения результатов и их анализ;
- раздел по безопасной жизнедеятельности и экологии;
- раздел по гражданской обороне;
- раздел по стандартизации;
- раздел по патентному поиску.

Заключение должно содержать:

- краткие выводы по выполнению задания на проект;
- оценку полноты решений поставленных задач;
- предложения по использованию, включая внедрение.

Список литературы должен содержать сведения об источниках, использованных при составлении расчетно-пояснительной записки. Сведения об источниках приводят в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1.

В приложения включают при необходимости описание аппаратуры и приборов, применяемых при проведении экспериментов, измерений и испытаний, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, разработанных в ходе выполнения проекта (работы), акты внедрения результатов работы, отчет о патентных исследованиях и другие материалы в соответствии с заданием на выпускную квалификационную работу.

РПЗ должна полностью отражать все приводимые при проектировании расчеты и построения. Технические расчеты должны содержать:

- эскиз или схему рассчитываемого изделия;
- задачу расчета (с указанием, что требуется определить при расчете);
- данные для расчета;
- расчет с анализом и обобщением полученных результатов;
- выбор одного проектного решения путем сравнения вариантов по техническим и экономическим показателям.

Правила оформления текстовых документов. Страницы текстовых документов и включенные в них иллюстрации, таблицы должны соответствовать формату А4 (297x211 мм) по ГОСТ 9327. Допускается представлять иллюстрации, таблицы, графики и схемы на листах формата А3 приложениями.

Текст выполняется с использованием компьютера и принтера – в редакторе Microsoft Word: шрифт Times New Roman, размер – 14, цвет шрифта – черный, междустрочный интервал – полуторный, отступ первой строки (абзацный отступ) 1,25 см, выравнивание текста – по ширине, расстановка переносов по тексту – автоматическая, в режиме качественной печати.

Текст следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 20 мм, правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 20 мм. Страницы должны быть заполнены текстом не менее чем на 1/3 часть.

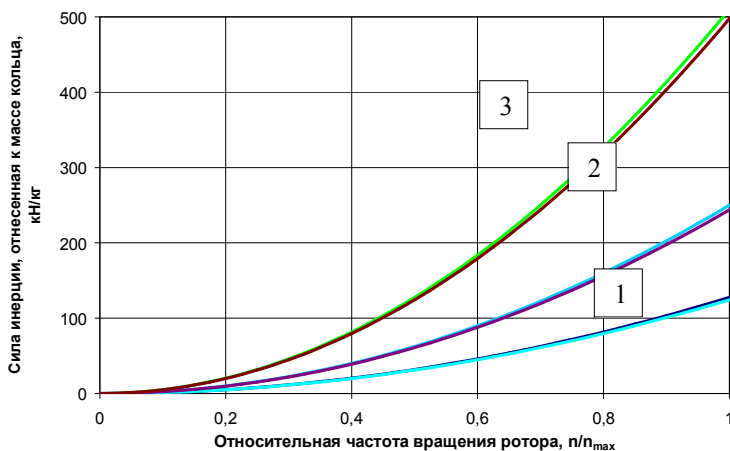
Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют и не выносятся в содержание. Заголовки следует печатать с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Между заголовком раздела и подраздела не должно быть пустых строк. Расстояние между заголовком раздела (подраздела) и текстом или пунктом должно быть

равно 1 строке. Каждый раздел текстового документа следует начинать с нового листа.

Иллюстрации. Иллюстрации следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. На все рисунки в тексте должны быть даны ссылки.

Иллюстрации должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД, СПДС. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается "Рисунок 1". Слово «Рисунок» и его наименование располагают посередине строки.

Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Например – Рисунок 2.1.



1 – коэффициент проскальзывания 0,05; 2 – коэффициент проскальзывания 0,07; 3 – коэффициент проскальзывания 0,1

Рисунок 2.1 - Сила инерции, действующая на уплотнительное кольцо

Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово "Рисунок" и наименование помещают после пояснительных данных.

Таблицы. Наименование таблиц должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Наименование следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Равновесный состав газовой среды

Обозначение	Камера	Критическое сечение	Срез сопла
<i>O</i>	0,0043	0,003	—
<i>H</i>	0,0323	0,0271	—
<i>O₂</i>	0,0053	0,0039	—
<i>H₂</i>	0.2139	0.2093	0,520
<i>OH</i>	0,0504	0.400	—
<i>H₂O</i>	0,6936	0,7167	0,80

Расстояние от текста до таблицы и от таблицы до последующего текста равно одной строке. Между наименованием таблицы и самой таблицей не должно быть пустых строк.

В результате прохождения преддипломной практики и выполнения дипломного проекта обучающийся должен обладать следующими **компетенциями**:

– способностью принимать участие в работах по расчету и конструированию отдельных деталей и узлов двигателей и энергетических установок ЛА в соответствии с техническими заданиями и использованием стандартных средств автоматизации проектирования;

– способностью разрабатывать рабочую проектную и техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы;

- способностью проводить технико-экономическое обоснование проектных решений;
- способностью составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с обоснованием принятых технических решений;
- способностью разрабатывать с использованием пакетов систем автоматического проектирования (САПР) технологические процессы как составную часть жизненного цикла авиационных и ракетных двигателей и энергоустановок;
- способностью обеспечивать защиту результатов интеллектуальной деятельности, участвовать в составлении заявок правоохранительных документов;
- способностью выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства.

В разделе литература должны быть представлены источники, рекомендуемые для использования студентами на этапе выполнении дипломного проекта.

3 Проектирование двигателя на компонентах топлива «кислород-метан»

Космическая техника решает все большее число задач прикладного характера, вызываемых непосредственными потребностями промышленности, сельского хозяйства. Здесь можно назвать задачи, связанные с метеорологическими наблюдениями, поиском полезных ископаемых, изучением водных ресурсов, экологических проблем, оценкой видов на урожай, распространением вредителей сельскохозяйственных культур, контролем за лесными пожарами и так далее. Появилась практическая возможность создания космических производственных комплексов по изготовлению полупроводниковых материалов с необычными свойствами, специальных сплавов, некоторых лекарственных препаратов и других биологических структур.

Трудно себе представить телевизионную технику, связь, навигацию и создаваемую всемирную информационную систему без большого числа специализированных спутников.

За годы второй половины XX столетия ракетно-космическая техника прошла огромный путь. Появились и утвердились новые отрасли этой техники и среди них – ракетное двигателестроение со сложной и многообразной наукой, в которой накоплен большой теоретический и практический материал.

Ракетным двигателем называют реактивный двигатель, не использующий для своей работы из окружающей среды ни энергию, ни рабочее тело. Таким образом, ракетный двигатель это установка имеющая источник энергии и запас рабочего тела, предназначенного для получения тяги путем преобразования любого вида энергии в кинетическую энергию рабочего тела, отбрасываемого от двигателя в окружающую среду. Иными словами, ракетный двигатель, использует для своей

работы энергию и массу, запасенные на борту летательного аппарата.

К ЖРД предъявляется ряд требований: длительное хранение, возможность транспортирования, высокие показатели удельной тяги. Эти требования постоянно ужесточаются в связи с расширением номенклатуры боевых ракет, запуском автоматических станций.

Независимо от назначения, типа и размеров двигателя неизменной тенденцией развития является освоение и внедрение новых, более эффективных топлив.

Одним из важных направлений развития ЖРД является использование резервов двигателя, выбор параметров двигателя: давление в КС, степень расширения сопла, схема двигателя и т.д. Выбор их тесно связан с конструкцией двигателя, с величиной тяги, временем работы и другими факторами.

В настоящем разделе в качестве примера приводятся основные разделы дипломного проекта, выполняемого как выпускная квалификационная работа по специальности 24.05.02. Цель данного дипломного проекта – разработка проекта жидкостного ракетного двигателя III степени с тягой 20т на Земле, топливными компонентами которого является кислород и метан (сжиженный природный газ в последующем именуемый СПГ).

3.1 Выбор топлива

3.1.1 Обоснование выбора топливной пары

В значительной степени характеристики ракетного двигателя определяют вид топлива и его свойства, что накладывает так же определенные условия на конструкцию и условия эксплуатации ракетного двигателя.

В ракетных двигателях в случае жидкого топлива раздельной подачи выделение энергии происходит в результате реакции окисления-восстановления.

Горючим является такое вещество, которое независимо от того, содержатся в нем окислительные элементы или нет, для полного окисления своих горючих элементов требует окислителя из вне.

Окислителем является вещество, в котором, хотя и могут быть горючие элементы, окисляющих элементов имеется значительный избыток, так что при полном окислении его собственных горючих элементов остается свободное количество окислительных элементов, которые могут быть использованы для окисления какого-либо другого горючего.

Ракетные топлива раздельной подачи должны удовлетворять следующим основным условиям:

- 1) высокая теплотворная способность;
- 2) малая молекулярная масса продуктов сгорания;
- 3) максимальная доля газов в продуктах сгорания.

Кроме того, к ракетным топливам предъявляют следующие требования:

- 1) длительность хранения и простота транспортирования;
- 2) низкая химическая агрессивность;
- 3) экологическая безопасность;
- 4) низкая стоимость производства.

Если группа топлив по физико-химическим свойствам соответствует назначению двигательной установки (ДУ), то дальнейший выбор должен основываться на следующих требованиях:

- 1) энергетические требования;
- 2) эксплуатационные требования;
- 3) экономические требования.

3.1.2 Энергетические требования

Наиболее важное требование к топливу - максимальное выделение энергии при его сгорании:

$$H = \left(\sum J_i \right)_T - \left(\sum J_i \right)_{п.с.} \quad (3.1)$$

где $\left(\sum J_i\right)_T$ - полная энтальпия топлива

$\left(\sum J_i\right)_{П.С.}$ - полная энтальпия продуктов сгорания

Удельный импульс тяги на расчетном режиме двигателя ($P_a = P_n$) равен скорости истечения газов, которая приблизительно выражается формулой:

$$W_a = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R_o T_{oc}}{\mu_{cm}} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{oc}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (3.2)$$

где P_{oc}, T_{oc} - давление и температура газа на входе в сужающуюся часть сопла;

P_a - давление на срезе сопла;

R - универсальная газовая постоянная;

μ_{cm} - молекулярная масса продуктов сгорания;

γ - показатель адиабаты.

Приращение скорости ступени летательного аппарата (ЛА) при отсутствии гравитации и аэродинамического сопротивления среды выражается формулой Циолковского:

$$\Delta V = W_{эф} \ln \left(\frac{m_0}{m_K} \right) = W_{эф} \ln \left(\frac{m_K + m_T}{m_K} \right) = W_{эф} \ln \left(1 + \frac{\rho_T V_T}{m_K} \right) \quad (3.3)$$

где m_0 - стартовая масса ЛА;

m_K - конечная масса ЛА;

$W_{эф}$ - эффективная скорость истечения продуктов сгорания (ПС);

V_T, ρ_T - объем и плотность топлива.

Анализ приведенных соотношений позволяет сделать вывод, что наиболее эффективные ракетные топлива должны обладать высокой теплотворной способностью, низкой моляр-

ной массой продуктов сгорания (ПС) и высокой плотностью компонентов.

Для получения высокотеплотворных топлив в качестве окислителя выгодно использовать фтор (F), кислород (O).

В качестве горючих выступают элементы первых трех периодов, в первую очередь водород, углерод и обогащенные водородом соединения углерода и азота.

Использование металлов в качестве горючего в РД является перспективным направлением с точки зрения повышения энергетических возможностей топлива, однако, сопровождается большими техническими сложностями, значительно сокращая их потенциальные энергетические возможности.

Максимальный удельный импульс имеют следующие топлива [2]:

$$\text{H}_2 + \text{F}_2 \quad I_y = 4776 \text{ м/с}$$

$$\text{H}_2 + \text{O}_2 \quad I_y = 4560 \text{ м/с}$$

$$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \quad I_y = 4470 \text{ м/с}$$

$$\text{керосин} + \text{O}_2 \quad I_y = 4455 \text{ м/с}$$

В данном дипломном проекте используется топливная пара кислород – метан.

3.1.3 Эксплуатационные требования

Данные требования связаны с непосредственной эксплуатацией двигателя в составе ракетносителя и должны характеризоваться:

- 1) высокой скоростью распространения пламени,
- 2) высокой температурой кипения,
- 3) термической стойкостью,
- 4) малой вязкостью и поверхностным натяжением,
- 5) малым периодом задержкой воспламенения (желательно самовоспламенение),

- 6) хорошей охлаждающей способностью,
- 7) отсутствие коррозионной активности в отношении конструкционных материалов.
- 8) нетоксичностью,
- 9) пожаробезопасностью,
- 10) взрывобезопасностью,
- 11) стабильностью при длительном хранении.

Пара СПГ + O₂ удовлетворяет всем этим требованиям кроме касающихся температуры кипения, так как оба компонента являются низкокипящими.

3.1.4 Экономические требования

Это в основном требования к стоимости получения и хранения топлив.

Кислород – распространенный элемент земной коры. В свободном состоянии он находится в атмосферном воздухе, в связанном виде входит в состав воды, минералов и горных пород.

В ракетостроении широко применяется жидкий кислород как наиболее универсальный окислитель, оставаясь при этом экологически безопасным.

СПГ – одно из самых распространенных топлив широкого применения в народном хозяйстве. За счет этого СПГ может производиться в больших количествах и имеет небольшую стоимость.

Метан как по плотности, так и по эффективности находится между керосином и водородом. Способы получения метана многочисленны. Главный источник метана природный газ, который состоит на 80..96% из метана. Остальное — это пропан, бутан и другие газы того же ряда, которые можно вообще не удалять, они очень схожи по свойствам с метаном. Другими словами, можно просто сжигать природный газ и использовать его как ракетное топливо. Возможность исполь-

зования метана в качестве ракетного топлива рассматривается уже на протяжении десятков лет. Например, в химкинском НПО «Энергомаш» исследования в части использования сжиженного газа в двигателях велись с 1981 года. Прорабатываемая сейчас в «Энергомаше» концепция предусматривает разработку однокамерного двигателя тягой в 200 т на топливе «жидкий кислород — сжиженный метан» для первой ступени перспективного носителя легкого класса.

Космическая техника ближайшего будущего обещает быть многоразовой. И тут открывается ещё одно преимущество метана. Он криогенный, а, значит, достаточно нагреть двигатель хотя бы до температуры -160 по Цельсию (а лучше выше) и двигатель сам освободится от компонентов топлива. По мнению специалистов он более всего подходит для создания многоразовых ракет-носителей.

Ещё один довод в пользу использования метана — возможность добывать его на астероидах, планетах и их спутниках, обеспечивая возвращаемые миссии топливом. Там намного легче добывать метан, чем керосин. Естественно, о возможности привозить топливо с собой не может быть и речи. Перспектива таких дальних миссий, весьма отдалённая, но некоторые работы уже ведутся.

К плюсам этого горючего также можно отнести хорошие энергетические показатели, стабильность, большой срок хранения и малую стоимость. Метан на данный момент — одно из самых перспективных горючих для ракетной техники. Есть все основания полагать, что в будущем он найдет широкое применение, но его мировая экспансия произойдёт не сразу, а только через некоторое время.

Применение пары СПГ + O_2 является обоснованным, так как удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к ДУ, не имеет недостатков, связанных с высокой токсичностью и высокой агрессивностью к конструкционным материалам (как, например, у топлив на основе фтора).

3.1.5 Основные физико-химические и теплофизические свойства компонентов топлива ЖРД

СПГ – простейший углеводород, бесцветный газ без запаха, химическая формула — CH_4 . Малорастворим в воде, легче воздуха. При использовании в быту, промышленности в метан обычно добавляют реагенты со специфическим «запахом газа». Взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5% до 15%. Основные свойства СПГ представлены в таблице 3.1 [2-5].

Таблица 3.1 - Горючее СПГ - CH_4

– Химическая формула	CH_4
– Молекулярный вес, μ	16,04(в а.е.м.)
– Плотность, ρ	419,7 кг/м ³
– Температура плавления, $T_{\text{пл}}$	90,52К
– Температура кипения, $T_{\text{кип}}$	111,51К
– Вязкость $\mu \times 10^4$	0,98 Н · с/м ²
– Удельная теплоемкость, C_p	2,22 в Дж/г·К
– Критическое давление, p^*	46,4 МПа
– Критическая температура, T^*	190,6 К
– Температура вспышки, $T_{\text{вс}}$	713 К
– Теплопроводность, λ	0,4 Вт/(м*К)
– Теплота сгорания, $Q_{\text{ст}}$	42916,75 кДж/кг

Основной компонент природных (77—99 %), попутных нефтяных (31—90 %), рудничного и болотного газов (отсюда другие названия метана — болотный или рудничный газ). В анаэробных условиях (в болотах, переувлажнённых почвах, рубце жвачных животных) образуется биогенно.

Получается также при коксовании каменного угля, гидрировании угля, гидрогенолизе углеводородов в реакциях каталитического риформинга.

Горит в воздухе голубоватым пламенем, при этом выделяется энергия около 39 МДж на 1м³. С воздухом образует взрывоопасные смеси. Вступает с галогенами в реакции замещения (например, $\text{CH}_4 + 3\text{Cl}_2 = \text{CHCl}_3 + 3\text{HCl}$), которые проходят по свободно радикальному механизму.

Сжиженный природный газ (СПГ, англ. LNG - liquefied natural gas), получается при охлаждении природного газа (Метана) до -162° Цельсия. В жидком состоянии объем газа уменьшается в 600 раз. Хранится СПГ, при низких температурах в особых криогенных сосудах, которые поддерживают низкую температуру газа, при давлении 0.4 МПа.

Основные свойства кислорода представлены в таблице 3.2 [2-5].

Таблица 3.2 - Окислитель - жидкий кислород (O₂ж)

– Химическая формула	O ₂
– Молекулярный вес, μ	32 (в а.е.м).
– Плотность, ρ	1136 кг/м ³
– Температура плавления, T _{пл}	54,36 К
– Температура кипения, T _{кип}	90,16 К
– Теплота испарения, Q _{исп}	213,5 кДж/кг
– Вязкость, $\mu \times 10^4$	2,0 Н/с × м ²
– Теплоемкость, C _p	1700 Дж/кг × К
– Критическое давление, p*	5,004 МПа
– Критическая температура, T*	154,34 К
– Критическая плотность, ρ^*	429,9 кг/м ³
– Газовая постоянная, R	257,8 кДж/кг × К
– Теплопроводность, λ	0,21 Вт/м × К

Жидкий кислород – прозрачная, легкоподвижная жидкость голубого цвета. С водородом (H_2) при нормальной температуре реагирует очень медленно, а выше $550^{\circ}C$ реакция протекает со взрывом.

Кислород можно получать:

- химическим способом;
- электролизом воды;
- разделением воздуха.

Большое распространение получил последний способ. При контакте с кислородом лучше всех ведут себя такие материалы, как медь (Cu), алюминий (Al), их сплавы Mg и Ti. Можно применять неметаллические материалы: фторопласты, голубой асбест.

При смешивании жидкого кислорода с органическими веществами возможно их замораживание. Такие смеси взрывоопасны, они чувствительны к удару, электрической искре.

При производстве жидкого кислорода особо опасно попадание ацетилена из воздуха и масла компрессоров. Определенная их концентрация приводит к взрыву.

Жидкий кислород нетоксичен, но при попадании на кожу вызывает обморожение с тяжелыми последствиями.

3.2 Пневмо-гидравлическая схема (ПГС) двигателя

3.2.1 Выбор схемы

Двигательная установка является независимым энергетическим комплексом летательного аппарата, способным обеспечить выполнение летного задания с требуемым качеством независимо от условий окружающей среды. ДУ включает в себя агрегаты двигателя, хранения и подачи топлива, а так же агрегаты системы управления обеспечивающие как процесс функционирования, так и управления параметрами ДУ с целью выполнения летного задания.

Многообразии типов ДУ [3-6], отличающихся видом применяемого топлива и способом его подачи, а также условиями эксплуатации в основном определяется многообразием полетных задач и собственных параметров ЛА. Кроме того, каждая полетная задача может иметь различный критерий оптимальности:

- точность вывода ЛА на орбиту;
- минимум времени вывода;
- максимум полезной нагрузки и др.

Разработка ПГС ДУ основывается на тщательном анализе прототипов ДУ и оценке возможности внесения в них таких изменений, которые способны улучшить свойства и характеристики вновь разрабатываемых двигателей.

Конструируемый двигатель должен соответствовать следующим требованиям:

- высокий удельный импульс;
- минимальная масса;
- высокая надежность;
- минимальное, но эффективное использование компонентов топлива.

Как видно, двигатель для космических полетов должен соответствовать жестким требованиям по эффективности и требует применения перспективных технологий.

Возможны два варианта подачи топлива:

- вытеснительная;
- насосная.

Первая является более простой по конструкции, но жестко ограниченной малым давлением подачи компонентов (а, следовательно, и давлением в камере сгорания P_K) и большим весом топливных баков, вследствие недостаточного предела прочности конструкционных материалов.

Насосная система представляет возможность получения более высоких давлений при меньшей массе конструкции. Увеличение давления подачи компонентов приводит к росту

давления в камере сгорания двигателя, что уменьшает ее габариты, а следовательно и ее массу.

В свете вышесказанного, выбираем насосную систему подачи, как более выгодную.

Для выбранного типа схемы двигателя различия в основном связаны с приводом турбины ТНА. Обычно, для этой цели используют продукты неполного сгорания компонентов, полученные в агрегате, называемом газогенератором. Данный метод в сочетании с дожиганием газа после турбины в камере сгорания вместе с основными компонентами позволяет создать высокое давление в камере сгорания, и высокую экономичность двигателя.

В соответствии с опытом разработки предприятием двигателей, для подачи компонентов топлива в камеру сгорания и газогенератор в проектируемом двигателе применен турбонасосный агрегат, выполненный по одновальной схеме, состоящий из двухступенчатого насоса окислителя, двухступенчатого насоса горючего и двухступенчатой турбины.

Для обеспечения высоких кавитационных качеств агрегатов подачи компонентов топлива в двигателе применены буcтерные турбонасосные агрегаты.

К основным особенностям двигателя по отношению к другим двигателям разработанных на предприятии можно отнести следующее:

- в качестве компонентов использованы кислород-метан;
- воспламенение компонентов топлива в газогенераторе проводится с помощью свечи электроплазменного типа, устанавливаемой непосредственно в смесительную головку газогенератора;
- схема двигателя обеспечивает работу газогенератора на всех режимах на газифицированном метане, что повышает энергетику начального этапа запуска газогенератора и исключает ряд сложных вопросов поджига компонентов топлива в нем при минимально низких давлениях на входе.

Проектируемый двигатель может использоваться в качестве 3 ступени ракетоносителя.

Для двигателя выбрана схема с дожиганием восстановительного генераторного газа в камере. Поджиг компонентов топлива в газогенераторе производится электрической свечой, в камере – запальником.

Пневмогидравлическая схема (ПГС) двигателя включает в себя следующие основные агрегаты и системы:

- камеру;
- газогенератор;
- систему подачи компонентов топлива;
- систему зажигания;
- систему регулирования;
- систему управления;

Принципиальная пневмогидравлическая схема показана на рисунке 3.1.

Перечень основных элементов ПГС, их позиционное обозначение, наименование и функциональное назначение приведены в таблице 3.3.

Камера КС1 – агрегат создающий тягу и обеспечивающий изменение вектора тяги при качании двигателя в кардане (на ПГС не показан) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Газогенератор ГГ1 – агрегат, вырабатывающий рабочее тело для питания турбины ТНА А2 и дальнейшего использования в качестве горючего в камере.

Система подачи компонентов топлива включает ТНА А2 с двухступенчатым насосом окислителя и двухступенчатым насосом горючего и бустерные турбонасосные агрегаты окислителя (БТНАО) А1 и горючего (БТНАГ) А3.

Ротор ТНА приводится во вращение газовой двухступенчатой турбиной, питаемой генераторным газом. Ротор БТНАО приводится во вращение гидравлической турбиной питаемой жидким кислородом, отбираемой из магистрали за насосом

окислителя ТНА. Ротор БТНАГ приводится во вращение газовой турбиной, питаемой генераторным газом, отбираемым после газогенератора.

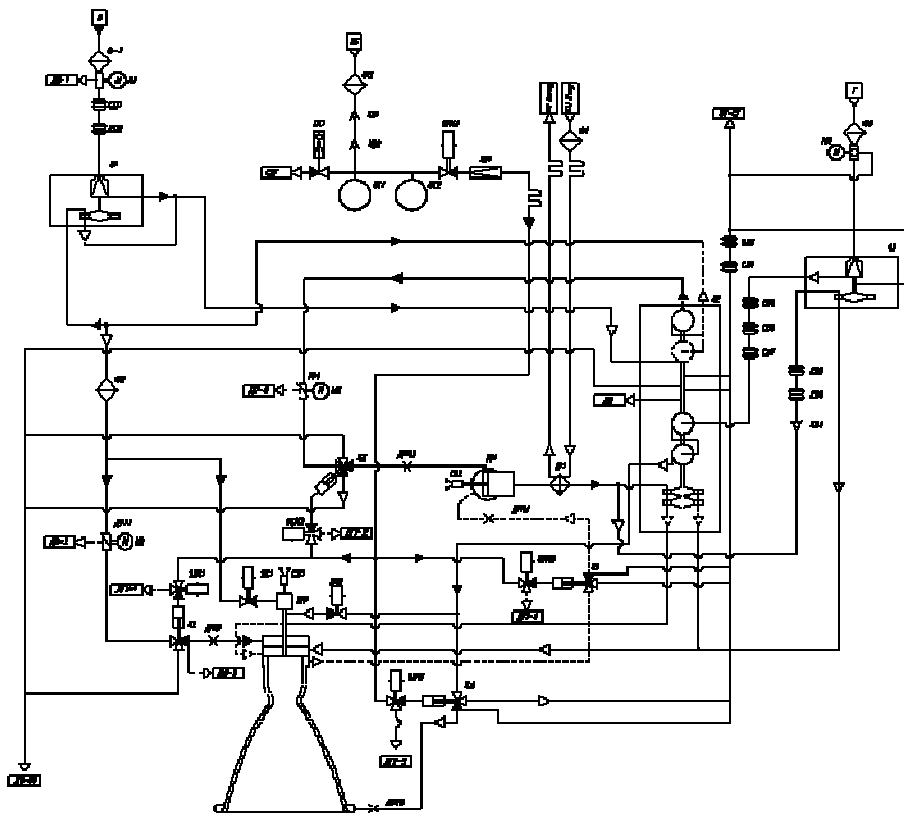


Рисунок 3.1 - Принципиальная пневмогидравлическая схема

Система зажигания включает электрическую свечу СЭ2, установленную в газогенераторе, запальник ЗП1 с электрической свечой СЭ1, установленный в камере и агрегат зажигания на (ПГС не показан). Запальник – форкамерного типа.

Система регулирования включает регулятор РР1 дроссель ДРР1. Регулятор является исполнительным агрегатом программного изменения тяги при выводе двигателя на номинальный режим и режим КСТ, а также для поддержания заданного уровня тяги при изменении соотношения компонентов топлива по командам системы управления (СУ).

Дроссель ДРР1 по команде СУ изменяет соотношение компонентов топлива в двигателе за счет регулирования расхода кислорода, поступающего в камеру и обеспечивает работу двигателя на запуске. Управление регулятором и дросселем осуществляется приводами М2 и М3 соответственно.

Система управления включает клапаны пуска К1 и К6, клапаны К2-К5, электроклапаны ЭК1-ЭК3, электропневмоклапаны ЭПК1-ЭПК6, баллоны АК1, АК2, редуктор КР1 и обратные клапаны К01-К04. Клапаны пуска, клапаны, электроклапаны и электропневмоклапаны являются исполнительными агрегатами управления запуском и остановом двигателя.

Открытие клапанов обеспечивается подачей напряжения на соответствующие электропневмоклапаны. Клапаны К2-К5 управляются гелием, поступающим в трубопровод-рессивер из баллонов АК1, АК2 с начальным давлением 310_{-10}^{+20} кгс/см² через электропневмоклапан ЭПК4 и редуктор КР1 на выходе из которого поддерживается давление 60_{-5}^{+10} кгс/см². Управление клапанами пуска К1 и К6 осуществляется приводами М1 и М4 соответственно.

Система наддува бака окислителя включает фильтр Ф4, теплообменник АТ1 для подогрева гелия и дроссельную шайбу ДРН5.

Таблица 3.3 – Перечень основных элементов ПГС

Позиционное обозначение	Наименование и функциональное назначение
1	2
A ₁	Бустерный турбонасосный агрегат окислителя (БТНАО)
A ₂	<i>Турбонасосный агрегат</i>
A ₃	Бустерный турбонасосный агрегат горючего (БТНАГ)
AK-1, AK-2	Балон с гелием для управления клапанами (V=10 л)
AT1	Теплообменник для подогрева гелия для наддува бака окислителя
ГГ1	<i>Газогенератор</i>
ДРН1-ДРН4	Шайба дроссельная
PP1	Дроссель для изменения соотношения компонентов топлива и для обеспечения запуска двигателя
K1	Клапан пуска для открытия и отсечки подачи окислителя в двигатель
K2	Клапан для открытия и отсечки подачи окислителя в камеру и слива окислителя при захолаживании двигателя и останове
K3	Клапан для открытия и отсечки подачи окислителя в газогенератор и слива окислителя при захолаживании двигателя и останове, а также для слива окислителя из газогенератора при выключении двигателя
K4	Клапан для открытия и отсечки подачи горючего в тракт охлаждения камеры и слива горючего через клапан K5 при захолаживании двигателя и останове

Продолжение таблицы 3.3	
К5	Клапан для открытия и отсечки подачи горючего в газогенератор и слива горючего при захлаживании двигателя и останове
К6	Клапан пуска для открытия и отсечки подачи горючего в двигатель
КО1, КО2	Клапан обратный
КО3	Клапан обратный
КО4	Клапан обратный
КР1	Редуктор давления гелия, используемого для управления клапанами
КС1	Камера
М1-М4	Привод
ПК1	Пироклапан для сброса гелия из баллонов
РР1	Регулятор для настройки двигателя на основной режим и режим КСТ
СЛ1-СЛ9	Компенсатор сильфонный
СЭ1, СЭ2	Свеча эрозионная СЭ 71М
Ф1	Фильтр подачи кислорода в двигатель
Ф2	Фильтр подачи кислорода на турбину БТНАО
Ф3	Фильтр в линии подачи гелия в баллоны АК1, АК2
Ф4	Фильтр в линии подачи гелия в теплообменник
Ф5	Фильтр в линии подачи метана в двигатель
ЭК1	Электроклапан для открытия и отсечки подачи кислорода в запальник
ЭК2	Электроклапан для открытия и отсечки подачи метана в запальник
ЭПК1-ЭПК3, ЭПК5	Электропневмоклапан открытия и отсечки гелия в клапаны для их срабатывания
ЭПК4	Электропневмоклапан для открытия и отсечки подачи гелия на вход в редуктор

Таблица 3.4 – Функциональное назначение присоединительных мест

Обозначение на схеме	Функциональное назначение присоединительных мест
1	2
О	Подача окислителя в двигатель (на вход в клапан пуска К1)
СБГ	Сброс гелия из баллонов АК1, АК2
ЗБ	Заправка баллонов АК1, АК2
ТН _{ВЫХОД}	Выход из теплообменника
ТН _{ВХОД}	Вход в теплообменник для подогрева гелия на наддув бака окислителя
ДГ-СГ	Отвод утечек из агрегатов линии горючего и слив метана при захолаживании в БРС-ГРН
Г	Подача горючего в двигатель (на вход в клапан пуска К7)
ДГУ-1	Отвод утечек гелия и гелия управления из ЭПК1 при срабатывании на открытие и закрытие (без трубопровода)
ДГУ-2	Отвод утечек гелия и гелия управления из ЭПК2 при срабатывании на открытие и закрытие (без трубопровода)
ДГУ-3	Отвод утечек гелия и гелия управления из ЭПК3 при срабатывании на открытие и закрытие (без трубопровода)
ДГУ-4	Отвод утечек гелия и гелия управления из ЭПК5 при срабатывании на открытие и закрытие (без трубопровода)
ДО-СО	Отвод утечек кислорода из ТНА и слив кислорода при захолаживании
ДО-1	Отвод утечек кислорода из клапана пуска К1 через штуцер (без трубопровода)

Продолжение таблицы 3.4	
ДО-2	Отвод утечек кислорода из дросселя ДРР1 через штуцер
ДО-3	Отвод утечек кислорода из клапана К2 через штуцер (без трубопровода)
ДО-4	Отвод утечек кислорода из регулятора РР1 через штуцер (без трубопровода)
ДП	Дренаж промежуточной полости ТНА (через трубопровод длиной 200-300 мм)

3.3.2 Циклограмма работы двигателя

Циклограмма работы двигателя определяется следующими этапами (Таблица 3.5)

- захлаживание двигателя;
- запуск двигателя на предварительный режим (далее именуемый режимом предварительной ступени тяги – ПСТ);
- перевод двигателя с режима ПСТ на основной режим (ОР);
- перевод двигателя с основного на конечный режим (далее именуемый режимом конечной ступени тяги – КСТ);
- останов двигателя.

Таблица 3.5 – Циклограмма работы двигателя

Время, с	Выполняемые команды
1	2
1. Исходное положение двигателя на начало захлаживания	
	1.1 Регулятор РР1 и дроссель ДРР1 находятся соответственно в положении φ_{\max} и α_{\max}
	1.2 Компоненты топлива находятся на входе в пусковые клапаны двигателя К1 и К6

Продолжение таблицы 3.5	
2. Захолаживание двигателя	
-200	2.1 Подача напряжения на приводы М1 и М4 – открытие клапанов пуска К1 и К6 в положение, соответствующее малому расходу топлива при захолаживании двигателя.
-50	2.2 Открытие клапана К4 – захолаживание камеры.
-5.0	2.3 Подача напряжения на приводы М1 и М4 – полное открытие клапанов пуска К1 и К6
3. Запуск двигателя	
-5.0	3.1 Подача напряжения на приводы М2 и М3 – перевод дросселя ДРР1 и регулятора РР1 из положений α_{\max} и φ_{\max} в положения α_o и $\varphi_{пст}$, соответствующие исходному положению дросселя и регулятора на момент запуска двигателя
-1.0	3.2 Включение агрегата зажигания – подача напряжения на свечи зажигания СЭ1 и СЭ2 3.3 Подача напряжения на электроклапан ЭПК4 – подвод гелия к электропневмоклапанам управления ЭПК1, ЭПК2, ЭПК3, ЭПК5 и ЭПК6. Заполнение гелием ресивера системы пневмоуправления двигателем. (Для УКВБ дополнительно осуществляется подвод гелия к электроклапанам управления ЭПК8 и ЭПК9).
	3.4 Заполнение магистралей топливом, от избыточного давления в баках.
0	3.5 Подача напряжения на электроклапан ЭК1 – подача кислорода в запальник КС. 3.6 Подача напряжения на электропневмоклапан ЭПК5 – открытие клапана К5 подачи метана в ГГ. Прекращение слива метана в магистраль слива ДГ-СГ.

Продолжение таблицы 3.5	
0	3.5 Подача напряжения на электроклапан ЭК1 – подача кислорода в запальник КС.
0,5 “Запуск”	3.6 Подача напряжения на электропневмоклапан ЭПК5 – открытие клапана К5 подачи метана в ГГ. Прекращение слива метана в магистраль слива ДГ-СГ. 3.7 Подача напряжения на электроклапан ЭК2 – подача метана в запальник КС. Воспламенение топлива в запальнике КС.
0,6	3.8 Подача напряжения на электропневмоклапан ЭПК2 – открытие клапана К3 подачи кислорода в ГГ. Прекращение слива кислорода из магистрали кислорода ГГ в магистраль слива ДО-СО. Воспламенение топлива в ГГ.
0,9	3.9 Подача напряжения на электропневмоклапан ЭПК1 – открытие клапана К2 подачи кислорода в КС. Прекращение слива кислорода из магистрали кислорода камеры в магистраль слива ДО-СО. Воспламенение топлива в КС.
1,1	3.10 Подача напряжения на привод М2 – перевод дросселя из положения α_o в положение $\alpha_{нст}$. Вывод двигателя на режим ПСТ.
~1,2-1,3	Подача напряжения на приводы М1 и М4 – закрытие клапанов пуска К1 и К6.
2,0	3.11 Снятие напряжения с электроклапана ЭК1 – прекращение подачи окислителя в запальник КС. Выключения запальника КС. 3.15 Снятие напряжения с электросвечей СЭ1, СЭ2.

Продолжение таблицы 3.5	
	<p>3.16 Снятие напряжения с электроклапана ЭК2 – прекращение подачи метана в запальник камеры через электроклапан ЭК2.</p> <p>3.17 Подача напряжения на приводы М2 и М3 перевод дросселя ДРР1 и регулятора РР1 из положений $\alpha_{нст}$ и $\varphi_{нст}$ в положения $\alpha_{ор}$ и $\varphi_{ор}$, соответствующие основному режиму работы двигателя. Вывод двигателя на основной режим.</p>
4. Работа двигателя на основном режиме	
4.0	<p>4.1 Снятие напряжения с электропневмоклапана ЭПК4 – прекращение подпитки гелием ресивера системы пневмоуправления двигателем.</p> <p>4.2 Снятие напряжения с электропневмоклапанов ЭПК1, ЭПК3, ЭПК5 – перевод клапанов К2, К4 и К5 в режим “самоудержания”.</p>
5. Перевод двигателя на режим КСТ	
$\tau_{кст}$	5.1 Подача напряжения на приводы М2 и М3 – перевод дросселя ДРР1 и регулятора РР1 из положений $\alpha_{ор}$ и $\varphi_{ор}$ в положения $\alpha_{кст}$ и
6. Останов двигателя	
$\tau_{выкл}$	6.1 Снятие напряжения с электропневмоклапана ЭПК2 – закрытие клапана К3 подачи кислорода в ГГ. Открытие слива кислорода из ГГ в магистраль слива ДО-СО.

3.3 Расчет камеры

3.3.1 Выбор давления в камере сгорания

Давление в камере сгорания (P_k) оказывает существенное влияние на параметры двигателя. С ростом давления в камере возрастает температура в камере сгорания (T_k), а при $P_a = const$ увеличивается степень расширения в сопле

$$\varepsilon = \frac{P_k}{P_a}, \quad (3.4)$$

и температура на срезе сопла T_a уменьшается

$$T_a = T_k \left(\frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{\kappa_{m+1}}{n_{u\partial}}}. \quad (3.5)$$

Влияние T_k мало по сравнению с влиянием ε . Из этого следует, что с ростом P_k растет удельный импульс тяги двигателя

$$I_{y\partial} = \sqrt{\frac{2n_{u\partial}}{n_{u\partial} - 1} RT \left(1 - \varepsilon^{\frac{n_{u\partial}}{1-n_{u\partial}}} \right)}. \quad (3.6)$$

Таким образом, с ростом давления в камере P_k возрастает термический КПД двигателя

$$\eta_t = 1 - \varepsilon^{\frac{1-K}{K}}.$$

Давление в камере сгорания также определяет геометрию КС и сопла двигателя. Площадь критического сечения резко уменьшается при увеличении давления за счет обратной зависимости от давления в КС

$$f_{np} = \frac{\beta \dot{m}_\Sigma}{P_k}, \quad (3.7)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{R_k T_k}{\varphi}},$$

$$\varphi = \sqrt{n} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{2} \left(\frac{n+1}{n-1} \right)}. \quad (3.8)$$

Соответственно изменяется и площадь на срезе сопла F_a

$$\frac{F_a}{F_{кр}} = \frac{\left(\frac{2}{n_{u\partial} + 1} \right)^{\frac{1}{n_{u\partial}}} \sqrt{\frac{n_{u\partial} - 1}{n_{u\partial} + 1}}}{\sqrt{\left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{2}{n_{u\partial}}} - \left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{n_{u\partial} - 1}{n_{u\partial}}}},$$

откуда

$$F_a = \frac{\beta \dot{m}_{\Sigma}}{P_{\kappa}} \frac{\left(\frac{2}{n_{u\partial} + 1} \right)^{\frac{1}{n_{u\partial}}} \sqrt{\frac{n_{u\partial} - 1}{n_{u\partial} + 1}}}{\sqrt{\left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{2}{n_{u\partial}}} - \left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{n_{u\partial} - 1}{n_{u\partial}}}}. \quad (3.9)$$

Таким образом, увеличение давления в камере сгорания приводит к уменьшению размеров камеры и, возможно, к уменьшению массы конструкции.

Расчет произведен в маткаде. Результаты расчёта приведены в виде графика на рисунке 3.2.

Максимальное значение давления $P_{\kappa} = 150.4$ атм.

Оптимальное значение $P_{\kappa_{opt}} = 0.8 P_{\kappa} = 120$ атм.

Оптимальное давление определено из условий равенства мощности турбин, мощности насосов ТНА, КПД насосов и

турбин и температуре газа перед турбиной. В данной схеме оптимальное давление в КС должно составлять величину порядка 120 атм.

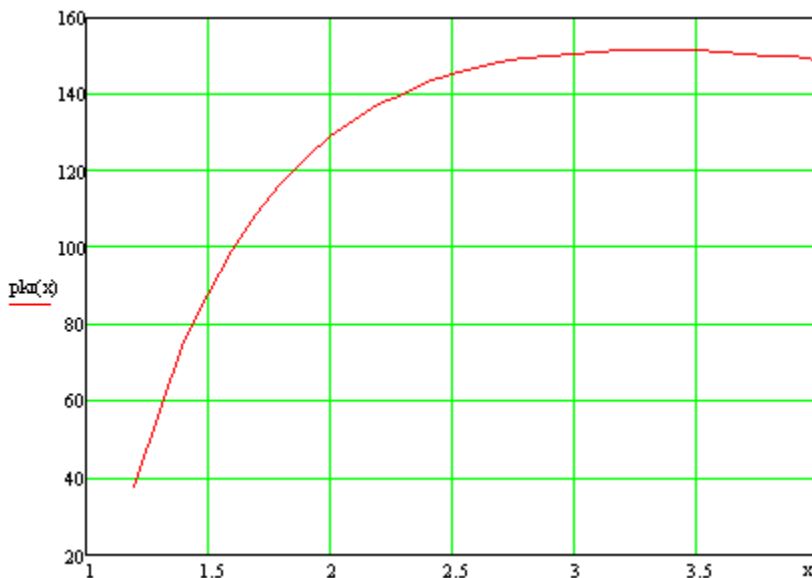


Рисунок 3.2 - Выбор оптимального давления в камере

3.3.2 Термодинамический расчет камеры сгорания и сопла

Целью расчета является определение термодинамических параметров продуктов сгорания в камере двигателя на срезе сопла и определения скорости истечения газов и определения удельного импульса тяги [3,4,7].

Для термодинамического расчета исходными данными являются элементарный состав топлива:

1. Соотношение компонентов.

Мольное стехиометрическое соотношение компонентов топлива - наименьшее число молей окислителя, необходимое для полного окисления одного моля горючего:

$$\chi_0 = \frac{(\text{молей}'' O'')}{(\text{молей}'' \Gamma''')} = \frac{2O_2}{1CH_4} = 2 \quad (3.10)$$

Массовое стехиометрическое соотношение

$$K_0 = \chi_0 \cdot \left(\frac{\mu_{ок}}{\mu_z} \right) = 2 \cdot \frac{32}{16,04} = 3,99 \quad (3.11)$$

Действительное соотношение компонентов отличается от стехиометрического и оценивается коэффициентом избытка окислителя

$$\alpha = \frac{\chi}{\chi_0} = \frac{K}{K_0} = \frac{3,4}{3,99} = 0,852 \quad (3.12)$$

2. Плотность топлива

Это расчетная величина, которая зависит от выбранного топлива и соотношения по формуле:

$$\rho_T = \frac{\rho_z \cdot \rho_o \cdot (K+1)}{\rho_z \cdot K + \rho_o} = \frac{1136 \cdot 419,7 \cdot (3,4+1)}{419,7 \cdot 3,4 + 1136} = 818,51 \text{ кг/м}^3 \quad (3.13)$$

3. Энтальпия топлива.

Суммарное содержание энергии в топливе определяется общей энтальпией:

$$J_T = \frac{J_z + K \cdot J_o}{1 + K} = \frac{-398,3 - 3,4 \cdot 4666,2}{3,4 + 1} = -3696,22 \quad (3.14)$$

4. Состав продуктов сгорания определяется исходным составом топлива и зависит от температуры и давления, а так же от полноты сгорания.

Для данного вида топлива исходными элементами являются С, Н, О.

Для определения состава и температуры продуктов сгорания в камере сгорания составляется система уравнений с использованием:

– закон химического равновесия

– закон сохранения вещества (уравнение материального баланса. Имеется равенство весовых качеств одних и тех же элементов в топливе и в образующих ПС)

– закон Дальтона (уравнение баланса парциальных давлений. Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений газов входящих в смесь)

– закон действия масс.

В расчет входят:

1) Определение состава и температуры продуктов сгорания диссоциации, но без учета физического не догорания топлива. При этом учитывается подвод тепла к топливу до входа в камеру (в рубашке охлаждения и газогенераторе);

2) Расчет изоэнтروпического истечения газа по соплу без учета теплообмена, потерь на трение и т.п. Для этого необходимо определить:

а) энтальпию ПС в камере сгорания

б) состав, температуру на срезе сопла и теоретическую скорость истечения ПС.

3) определение полного содержания ПС на срезе сопла;

4) Определение теоретического удельного импульса тяги, расхода топлива, показателя изоэнтропии и геометрии камеры сгорания и сопла.

Теоретический расчет выполняется при допущениях:

1) коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$ одинаковый по поперечному сечению камеры;

2) процессы подвода тепла являются изобарическими, процессы расширения рабочего тела – адиабатическими;

3) процессы в камере сгорания являются стационарными, предполагается идеальное соотношение компонентов топлива и его полное горение;

4) продукты сгорания в конце камеры представляют собой продиссоциированную газовую смесь, находящуюся в полном химическом равновесии, соответствующей диапазону давления и температуре в камере;

5) скорость движения газового потока на участке подвода тепла пренебрегаем;

6) трение газов о поверхность оболочки сопла и камеры отсутствует;

7) трение газа в сопле камеры двигателя являются изэнтропически;

8) течение газа в сопле стационарное и одномерное.

Запишем общий вид системы уравнений:

$$K_1 = \frac{P_{CO} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{CO_2}} = f_1(T_K);$$

$$K_2 = \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} = f_2(T_K);$$

$$K_3 = \frac{P_{OH} \cdot P_{H_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} = f_3(T_K);$$

$$K_4 = \frac{P_H^2}{P_{H_2}} = f_4(T_K);$$

$$K_5 = \frac{P_O^2}{P_{O_2}} = f_5(T_K);$$

$$K_6 = \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O_2}} = f_6(T_K);$$

$$K_7 = \frac{P_{H_2}^{0,5} \cdot P_{CO}}{P_{HCO}} = f_7(T_K)$$

$$K_8 = \frac{P_H \cdot P_{O_2}}{P_{HO_2}} = f_8(T_K)$$

$$K_9 = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}^{0,5}}{P_{COOH}} = f_9(T_K)$$

$$C_T = \frac{C_T + \varphi C_O}{1 + \varphi} = 12 \frac{M_\Sigma}{1000 P_\Sigma} (P_{CO_2} + P_{CO});$$

$$H_T = \frac{H_T + \varphi H_O}{1 + \varphi} = \frac{M_\Sigma}{1000 P_\Sigma} (2P_{H_2O} + 2P_{H_2} + P_{OH} + P_H);$$

$$O_T = \frac{O_T + \varphi O_O}{1 + \varphi} = 16 \frac{M_\Sigma}{1000 P_\Sigma} (2P_{CO_2} + 2P_{H_2O} + P_{O_2} + P_{HO} + P_{CO} + P_O)$$

$$;$$

$$P_2 = \sum P_i;$$

$$\mu_\Sigma = \frac{\sum \mu_i P_i}{P_\Sigma};$$

$$J_{ПТ} = [J_{\eta, н. с.}] T_i$$

В эту систему из 15 уравнений входя 15 неизвестных величин, а именно: 12 парциальных давлений газов, составляющих смеси μ_Σ , T_2 поэтому система парциально может быть решаемая.

Существует несколько методов решения системы:

1) Прямое аналитическое решение

Для большинства современных топлив, дающих большое количество продуктов сгорания, такая методика решений приводит к слишком громоздкому и требующему большой затраты времени

2) Метод последовательных приближений

Задается температура ПС близкая к действительной, и производя расчет находят полную энтальпию ПС. Если уравнения (3.14) выполняются с заданной точностью, то расчет проведен правильно. В противном случае задаются другой температурой.

3) Графический метод последовательных приближений

а) График задается тремя температурами T' , T'' , T''' , так чтобы расчетная температура в камере находилась между T' и T''' ;

б) для каждой из них определяется состав ПС;

в) по составу ПС для каждой из температур определяют полные энтальпии ПС;

г) строят вспомогательный график и на нем, зная полную энтальпию топлива $J_{пт} = J_{пс}$ определяют температур T'' ;

д) по найденной температуре T'' производят окончательный расчет.

4) Кинематический метод расчета

степенные уравнения приводятся к дифференциальным и последующие их решение в конечных разностях.

5) Решение с помощью энтропических диаграмм

6) Решение интегрированием по таблицам

Тепловой расчет камеры двигателя выполняется в следующем порядке:

1) Одним из вышеперечисленных методов решается система уравнений и определяется температура в камере (T_2), состав продуктов сгорания, затем по составу продуктов сгорания определяется $\rho_2, R, \mu_\Sigma, J_{пс}$.

2) задаем ориентировочным значением показателя изоэнтропии и определяем ожидаемую температуру на срезе сопла.

$$T_{a.onm} = T_2 \left[\frac{P_a}{P_k} \right]^{\frac{n_{из}-1}{n_{из}}} \quad (3.15)$$

3) одним из методов решается система уравнений с учетом равенства энтропий ρ_λ, ρ_a , для определения состава ПС на срезе сопла

4) По составу ПС на срезе определяем $T_3, \rho_3, R_3, \mu_\Sigma, J_{пс}, n_{из}$

5) Определяем перепад полного теплосодержания, ΔJ_n , ушедший на создание скоростей W_a , $\Delta J_n = J_{nnc2} - J_{nnc3}$, т.к. истечение принимается адиабатное, то теоретическая скорость истечения вычисляется по формуле

$$W_3 = \sqrt{\Delta J_n} ; W_3 = \sqrt{2 \frac{n_{uz}}{n_{uz} - 1} RT_2 \left[1 - \frac{1}{\varepsilon} \right]^{\frac{n_{uz} - 1}{n_{uz}}}} \quad (3.16)$$

тогда

$$J_y = W_3 + f_a (P_a - P_H) . \quad (3.17)$$

Результаты термодинамический расчет камеры сгорания и сопла приведены в таблицах 3.6 – 3.8. В таблицах использованы следующие обозначения:

P – давление;

T – температура;

μ – средний молекулярный вес;

a – скорость звука в равновесно реагирующей смеси;

M – число Маха;

n – средний показатель изоэнтропы расширения от P_{CO} до P_{CO} / ε ;

W – скорость потока;

β – расходный комплекс для значения $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$;

I_H – удельный импульс в пустоте для значения $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$;

C_{pf} – удельная «замороженная» теплоемкость продуктов сгорания;

C_p – удельная равновесная теплоемкость продуктов сгорания;

O, H, O₂, H₂, OH, H₂O, CO, CO₂ – мольные доли газообразных веществ.

Таблица 3.6

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Коэффициент избытка окислителя	α	—	0,852
Соотношение компонентов	K_m	$\frac{кг\ OK}{кг\ z}$	3,4
Средняя плотность топлива	ρ_m	кг/м ³	818,511
Удельная энтальпия топлива	I_T	кДж/кг	-3696.22

Таблица 3.7

Обозначение	Размерность	Камера	Критическое сечение	Срез сопла
P	атм	120	69,36	0.066
T	К	3656,1	3474,1	1440
μ	кг/моль	21,719	21,998	23,53
M	м/сек.	—	1,0	4,739
W	м/сек.	—	1220,3	3711,5
β	м/сек.	—	1863,5	—
C_{Pf}	кДж/кг×К	2.3565	2.3419	1,9842
C_P	кДж/кг×К	6.7416	6.5848	2,0739
R	кДж/кг×К	0.382	0.37796	0.35336
K_3	—	—	1.2236	0.92652

Продолжение таблицы 3.7				
Кп	—	—	1.232	2.0653
n	—	—	1.1316	1.1561
H	кДж/кг	-1368,3	-2112,9	-8256
S	кДж/кг × К	12.035	12.035	12.035

Таблица 3.8 - Равновесный состав газовой среды

Обозначение	Камера	Критическое сечение	Срез сопла
H	0.02172	0.01876	$0.1 \cdot 10^{-4}$
O ₂	0.02326	0.01993	$0.3 \cdot 10^{-9}$
H ₂	0.08067	0.07705	0.0995
OH	0.06535	0.0567	$0.1 \cdot 10^{-5}$
HO ₂	$0.17 \cdot 10^{-3}$	$0.11 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-13}$
H ₂ O	0,491	0,5089	0,5671
CO	0.1797	0.173	0.0973
CO ₂	0.1279	0.13822	0.236
H ₂ O ₂	$0.3 \cdot 10^{-4}$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$
HCO	$0.2 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-9}$
COOH	$0.2 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-9}$
O	0,01	0,0079	$0.1 \cdot 10^{-9}$

3.3.3 Определение формы и размеров камеры сгорания

Наиболее широкое распространение получила камера сгорания цилиндрической формы. Она более технологична, а ее головка обычно имеет плоскую форму, что также упрощает технологию изготовления. Один из основных недостатков цилиндрических камер – большая поверхность охлаждения, увеличивающая теплонапряженность. Применение шарообразных камер или камер, каких-либо других форм является нецелесообразным и менее выгодным, главным образом из-за очень сложной технологии их изготовления.

Пользуясь ранее полученными данными, определяется один из основных размеров камеры – площадь критического сечения. Площадь критического сечения или его диаметр обычно являются исходной точкой для определения формы и размеров камеры сгорания.

Согласно работам [2-5] удельный импульс тяги в пустоте:

$$I_{уд.n} = \frac{\sqrt{T_{\kappa}}}{B} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} L(\lambda_a), \quad (3.18)$$

где $L(\lambda_a)$ - значение газодинамической функции полного импульса потока;

$\lambda_a = W_a / a_{кр}$ - коэффициент скорости потока на срезе сопла;

$$B = \sqrt{n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}} \sqrt{\frac{1}{R_a}} \quad (3.19)$$

Значение газодинамической функции полного импульса потока:

$$L(\lambda_a) = \lambda_a + \frac{1}{\lambda_a} \quad (3.20)$$

Действительный удельный импульс:

$$I_{y\partial} = I_{y\partial}^T \varphi_{\Sigma} \quad , \quad (3.21)$$

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_k * \varphi_c \quad ,$$

где φ_k - коэффициент потерь в камере, $\varphi_k = 0,98$;

φ_c - коэффициент потерь в сопле.

Последний определяется как:

$$\varphi_c = \varphi_{mp} \cdot \varphi_v \cdot \varphi_Q \quad ,$$

где φ_{mp} - коэффициент, учитывающий потери на трение при течении газового потока вдоль стенки камеры; это вязкое трение создает силу, стремящуюся увлечь стенку в направлении потока, то есть силу противоположную тяге

($\varphi_{mp} = 0,975 \div 0,990$);

φ_v - коэффициент потерь, отражающий газодинамические потери, связанные с неравномерностью поля скоростей по величине и направлению на срезе сопла;

φ_Q - коэффициент, учитывающий термодинамические потери. К ним относят недовыведение тепла в сопле за счет некоторой неравномерности и потери за счет теплоотдачи в стенку ($\varphi_Q = 0,990 \div 0,998$).

Тогда коэффициент

$$\varphi_c = 0,985 \cdot 0,99 \cdot 0,998 = 0,973 \quad ;$$

$$\varphi_{\Sigma} = 0,98 \cdot 0,973 = 0,953 \quad ;$$

$$a_{кр} = \sqrt{2 \frac{n}{n+1} RT} = \sqrt{2 \cdot \frac{1.1561 \cdot 353.36 \cdot 1440}{1.1561 + 1}} = 738.7 \quad ,$$

$$B = \sqrt{1.1561 \left(\frac{2}{1.1561 + 11} \right)^{\frac{1.1561 + 1}{1.1561 - 1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{353.36}}} = 0.03404$$

$$\lambda_a = \frac{W_a}{a_{кр}} = \frac{3711.5}{738.7} = 5,0243$$

$$L(\lambda_a) = \lambda_a + \frac{1}{\lambda_a} = 5,0243 + \frac{1}{5,0243} = 5,22339$$

Тогда импульс в пустоте

$$I_{y\partial.n} = \frac{\sqrt{1440}}{0,03404} \left(\frac{2}{1,1561 + 1} \right)^{\frac{1}{1,1561 - 1}} \cdot 5,22339 = 3755,89 \text{ м/с}$$

$$I_{y\partial.n} = \frac{3755,89}{9,8065} = 383$$

Удельный импульс с учетом потерь

$$I_{y\partial} = I_{y\partial}^T \varphi_{\Sigma} = 383 \cdot 0,953 = 365 \quad (3.22)$$

действительный расход топлива

$$\dot{m}_T = \frac{P}{I_{y\partial}} = \frac{20000}{365} = 57,794 \text{ кг/с}; \quad (3.23)$$

расход горючего

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_T}{1 + K_M} = \frac{57,794}{1 + 3,4} = 12,453 \text{ кг/с}; \quad (3.24)$$

расход окислителя

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_T \cdot K_M}{1 + K_M} = \frac{57,794 \cdot 3,4}{1 + 3,4} = 42,341 \text{ кг/с}; \quad (3.25)$$

Теоретическая площадь критического сечения определяется формулой

$$F_{кр}^T = \frac{\beta \cdot \dot{m}_T}{P_{\kappa}} \quad (3.26)$$

где β - расходный комплекс

$$\beta = \frac{\sqrt{R_{\kappa} T_{\kappa}}}{\sqrt{n} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{(n+1)}{2(n-1)}}} = \frac{\sqrt{382,82 \cdot 3656,5}}{\sqrt{1,13} \cdot \left(\frac{2}{1,13+1} \right)^{\frac{1,13+1}{2 \cdot (1,13-1)}}} = 1863,5 \text{ м/с}$$

$$F_{кр}^T = \frac{\beta \cdot \dot{m}_T}{P_{\kappa}} = \frac{1863,5 \cdot 54,7}{11768000} = 0,0085439 \text{ м}^2$$

Диаметр критического сечения

$$D_{кр} = 104,3 \text{ мм}$$

По формуле определяем геометрическую степень расширения сопла

$$\frac{F_a}{F_{кр}} = \frac{\left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}{\sqrt{\left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_a}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{n+1}{n}}}} \quad (3.27)$$

Отсюда площадь выходного сечения сопла

$$F_a = 1,135 \text{ м}^2$$

Диаметр выходного сечения сопла

$$D_a = \sqrt{\frac{4F_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,135}{3,14}} = 1200 \text{ мм.}$$

3.3.4 Профилирование сопла

Выбор контура сопла. Сопло является необходимым элементом ракетного двигателя. В нем происходит преобразование тепловой энергии продуктов сгорания в кинетическую энергию истекающей из сопла струи газа. Величина кинетической энергии в конечном итоге определяет главные характеристики двигателя – его экономичность или удельный импульс.

Всякий реальный процесс преобразования энергии сопровождается некоторыми потерями. В данном случае потери снижают кинетическую энергию струи и, следовательно, удельный импульс. Поэтому одной из задач организации рабочего процесса в соплах ракетных двигателей является снижение всякого рода потерь и максимальное приближение реального процесса истечения из сопла к идеальному при минимальном весе и габаритах.

В настоящее время применяются или исследуются возможность применения следующих основных типов сопел: коническое, профилированное и сопла с центральным телом.

Сопла с центральным телом имеют значительно меньшую длину (порядка двух раз), чем остальные типы сопел, что дает ощутимый выигрыш в габаритах (а значит и весе) двигателей больших тяг порядка нескольких сотен тонн. Однако, у данного типа сопла имеется ряд недостатков, связанных со сложностью и необычностью кольцевой конструкции камеры сгорания, вследствие чего возникают сложные проблемы прочности, охлаждения стенок, организации рабочего процесса в камере, а также усложняется технология, что увеличивает затраты на изготовление.

Конические сопла относятся к так называемым «круглым» соплам (по форме критического сечения) и имеют за критическую часть в виде конуса с прямой образующей. Они наиболее просты в изготовлении. Однако из-за наличия не

осевой составляющей скорости происходит потеря удельного импульса, что ухудшает их характеристики.

Профилированные сопла имеют образующую закритической части, выполненную по кривой, совпадающей с линией тока. Профиль сопла изменяется достаточно плавно, так что косые скачки уплотнения не возникают. Имея при заданном значении тяги приемлемую длину данный тип представляется более выигрышным по величине потерь в отношении конического сопла и по простоте изготовления (а значит трудоемкости и себестоимости) в отношении сопла с центральным телом.

Исходя из вышесказанного, принимается последний тип сопла.

Профилирование дозвуковой части. Дозвуковая часть сопла должна обеспечивать безотрывное, во избежание прогаров, течение с равномерным по сечению и известным полем скоростей, дозвуковая часть сопла состоит из трех основных элементов:

- а) область выхода в дозвуковую часть с радиусом r_1 ;
- б) конический участок с углом θ_{ex} ;
- в) область критического сечения с радиусом r_2 ;

При выборе конкретных размеров необходимо руководствоваться соображениями, что радиус скругления на входе r_1 и угол конического участка θ_{ex} оказывают основное влияние на характер течения в дозвуковой части. При малом радиусе скругления ($r_1 < 0,7 R_{ex}$) и большом угле ($\theta_{ex} > 0,7$ рад.) на входе в дозвуковую часть, как правило, имеет место отрыв от стенки. Радиус очертания контура сопла в области критического сечения r_2 влияет на два фактора. Наибольшие скорости потока в дозвуковой части сосредоточены в области критического сечения. Поэтому потери на трение в дозвуковой

части в основном зависят от r_1 , чем больше радиус очертания r_1 , тем больше потери на трение. С другой стороны, уменьшение радиуса r_1 приводит к значительной неравномерности скорости в критическом сечении и к искривлению линии скоростей.

Эта неравномерность скорости будет трансформироваться по сверхзвуковой части, и в выходном сечении сопла появится дополнительная неравномерность потока, которая приведет к увеличению потерь на рассеивание. Чем меньше, $R_{кр}$ тем больше будут эти потери. Эти два фактора и определяют оптимальную величину радиуса очертания критического сечения. Величина угла незначительно сказывается на формировании потока, однако, сильно влияет на интенсивность теплоотдачи к стенке.

Расчёт докритической части канала, и построение профиля производится на основе эмпирических зависимостей.

Определение приведенной и условной длины канала:

$$L_{пр} = \frac{(12,5...15) \cdot 10^3}{\sqrt{10 \cdot P_k}}, \quad (3.28)$$

$$L_{пр} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{10 \cdot 11768000}} = 1,382 \text{ м.}$$

$$L_k = (0,03...0,25) \sqrt{d_{кр}}, \quad (3.29)$$

где критический диаметр подставляется в миллиметрах.

$$L_k = 0,25 \cdot \sqrt{52,15} = 0,3063 \text{ м.}$$

Относительная площадь канала:

$$\bar{F}_k = \frac{F_k}{F_{кр}} = \frac{L_{пп}}{L_k}, \quad (3.30)$$

$$\bar{F}_k = \frac{1,3827}{0,3063} = 4,513.$$

Расчет геометрических размеров камеры.

Объем камеры

$$V_k = L_{пп} \cdot F_{кр} = 1,3827 \cdot 8,544 \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ м}^3. \quad (3.31)$$

площадь поперечного сечения канала

$$F_k = \bar{F}_k \cdot F_{кр} = 4,513 \cdot 8,544 \cdot 10^{-3} = 0,039 \text{ м}^2. \quad (3.32)$$

радиус цилиндрической части канала

$$R_k = \sqrt{\frac{F_k}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,039}{3,14}} = 0,11078 \text{ м}. \quad (3.33)$$

длина конфузора:

$$l_{вх} = 0,5 \cdot d_{кр} \cdot \sqrt{\left(2 + \rho \cdot \sqrt{\bar{F}_k}\right)^2 - \left[(\rho - 1) \cdot \sqrt{\bar{F}_k} + 3\right]^2}, \quad (3.34)$$

где $\rho = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot p_k$.

$$l_{вх} = 0,21683 \text{ м}.$$

размеры конфузора:

$$h = \frac{2l_{вх}}{2 + \rho \sqrt{\bar{F}_k}} = 0,052566 \text{ м}, \quad (3.35)$$

$$H = l_{вх} - h = 0,16427 \text{ м}, \quad (3.36)$$

$$\bar{y} = \frac{h}{l_{вх}} \cdot \sqrt{\bar{F}_k} + \frac{H}{l_{вх}} = 1,273 \quad (3.37)$$

$$y = \bar{y} \cdot R_{кр} = 1,273 \cdot 0,05215 = 0,066365 \text{ м},$$

объем конфузора

$$V_{\text{конф}} = F_{\text{кр}} \cdot l_{\text{вх}} \left\{ \left[(2\bar{F}_k + \bar{y}^2) \cdot \frac{H}{3l_{\text{вх}}} \right] + \left[(\bar{y}^2 + \bar{y} + 4) \cdot \frac{h}{6l_{\text{вх}}} \right] \right\} = 0,005496 \text{ м}^3,$$

длина цилиндрической части

$$l_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{к}} - V_{\text{конф}}}{F_{\text{к}}}, \quad (3.39)$$

$$l_{\text{ц}} = \frac{0,012 - 0,00549}{0,039} = 0,16384 \text{ м.}$$

радиусы сопряжения

$$R_1 = 2 \cdot R_{\text{кр}}, \quad R_1 = 0,1043 \text{ м.} \quad (3.40)$$

$$R_2 = \rho \cdot R_{\text{к}}, \quad (3.41)$$

$$R_2 = 2,942 \cdot 0,11078 = 0,32593 \text{ м.}$$

Профиль дозвуковой части приведен на рисунке 3.3.

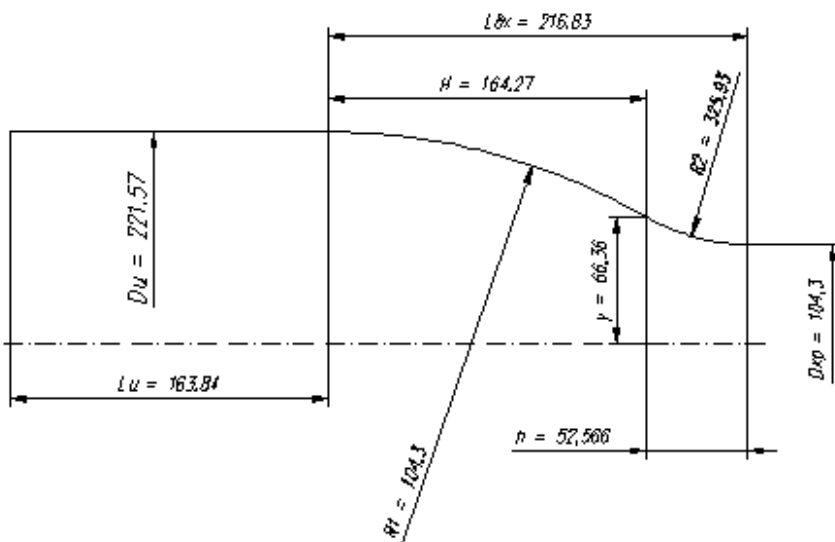


Рисунок 3.3 - Профиль дозвуковой части камеры

Профилирование сверхзвуковой части сопла. Учитывая особенности сверхзвукового течения, к контуру сверхзвуковой части сопла предъявляются значительно более строгие требования, чем к дозвуковой части. Контур необходимо выбирать так, чтобы все струи имели возможность непрерывно изменять сечение так, чтобы происходило непрерывное увеличение скорости истечения. При профилировании сверхзвуковой части сопла необходимо определить такой контур, который удовлетворил бы следующим требованиям:

- 1) сопло должно иметь минимальные потери тяги;
- 2) поверхности стенок при заданных F_a и $F_{кр}$ должны быть минимальными;
- 3) конструкция и технология изготовления стенок сопла должны быть возможно более простыми.

Преимуществами конического сопла являются:

- простота изготовления;
- возможность перехода на большие или меньшие стенки расширения;

Однако из-за наличия не осевой составляющей происходит потеря удельного импульса, поэтому, с целью улучшения характеристик и уменьшения длины, принято профилированное сопло. В соплах такой конфигурации применяется участок быстрого расширения или радиального течения, который затем переходит в равномерный осевой поток у выходного сечения сопла. Профиль сопла изменяется достаточно плавно, так что косые скачки не возникают. Оптимальные контуры сопла могут быть достаточно точно аппроксимированы при правильном выборе исходных данных. Обычно, для проведения расчетов применяется методика, по которой составлены программы для ЭВМ и приведены таблицы расчетов.

Для реальной оценки действительного импульса сопла необходимо определить идеальный импульс сопла и коэффициент потерь в сопле. В общем случае ξ_c записывается как сумма коэффициентов потерь импульса от всех факторов,

учитывающих отличие реального течения от течения в идеальном сопле с идеальным процессом расширения:

$$\xi_c = \xi_f + \xi_{mp} + \xi_{вх} + \xi_{fu} + \xi_{усл} + \xi_{кор}, \quad (3.42)$$

где ξ_f - коэффициент потерь импульса на рассеяние, связанное с непараллельностью вектора скорости к оси в выходном сечении сопла;

ξ_{mp} - коэффициент потерь на трение, связанных с течением вязкого газа в реальном сопле;

$\xi_{вх}$ - коэффициент входных потерь, вследствие наличия неравномерности скорости течения в критическом сечении, которая, в свою очередь будет трансформироваться по сверхзвуковой части и в выходном сечении появляется дополнительная неравномерность потока, что и приводит к потере импульса;

ξ_{fu} - коэффициент потерь импульса за счет отклонения профиля из-за технологических и других соображений;

$\xi_{усл}$ - коэффициент потерь, связанных с течением в районе критики вязкого реального газа;

$\xi_{кор}$ - коэффициент потерь, связанных с конечными скоростями установления физико-химического равновесия в потоке газа.

Потери на рассеивание сводятся к минимуму при применении профилированных сопел. Каждая точка сверхзвукового контура для любой линии тока характеризуется следующими параметрами:

- абсциссой x (расстояние от критического сечения до данного);
- ординатой y (длина радиуса в данной точке, отнесенного к радиусу критического сечения);
- углом наклона контура θ к оси x в данной точке;
- значением числа Маха в данной точке контура;

- значением безразмерного интеграла сил давления по сверхзвуковой части сопла в данной точке;
- величиной боковой поверхности сверхзвуковой части сопла в данной точке:

$$\pi = 2 \int \frac{y dy}{\sin \theta} \quad (3.43)$$

- тремя значениями величины потери импульса, отнесенных к радиусу сопла в данной точке.

Порядок профилирования. Результаты расчета координат контура профиля сверхзвуковой части сопла и распределение числа M_{cm} вдоль стенки сопла приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

1	L , мм	D , мм	M_{cm}
1	0	104,3	1,0
2	10	107,951	1,914
3	20	119,665	2,124
4	30	133,095	2,233
5	40	146,833	2,330
6	50	160,756	2,413
7	60	174,781	2,488
8	70	188,819	2,556
9	80	202,788	2,619
10	90	216,633	2,678
11	100	230,303	2,734
12	150	295,769	2,954
13	200	356,266	3,191
14	300	464,204	3,402
15	400	558,414	3,59
16	500	642,162	3,74
17	600	717,654	3,864
18	700	785,897	3,968
19	800	848,422	4,059
20	900	905,959	4,139
21	1000	958,826	4,21
22	1100	1007,181	4,273

Продолжение таблицы 3.9			
23	1200	1051,142	4,33
24	1300	1090,814	4,380
24	1400	1126,301	4,424
26	1500	1157,708	4,463
27	1600	1185,139	4,497
28	1656,369	1200	4,515

Координаты контура сверхзвуковой части сопла выбраны на основании следующих исходных данных:

- диаметр минимального сечения сопла $D_k = 104,3$ мм;
- диаметр выходного сечения сопла $D_a = 1200$;
- показатель изоэнтропы истечения $\chi_{из} = 1,183$.

В результате расчета выбран контур сверхзвуковой части сопла, характеризующейся следующими параметрами:

- расчетное число Маха $M_0 = 4,515$;
- геометрическое число Маха $M_0 = 4,31$;
- диаметр минимального сечения сопла $D_k = 104,3$ мм;
- диаметр выходного сечения сопла $D_a = 1200$ мм;
- показатель $\chi = 1,2$;
- длина сверхзвуковой части сопла $L_a = 1656,36$;
- угол наклона контура сопла в выходном сечении к оси сопла $\theta_a = 8,15^0$. Газодинамический профиль камеры приведен на рисунке 3.4.

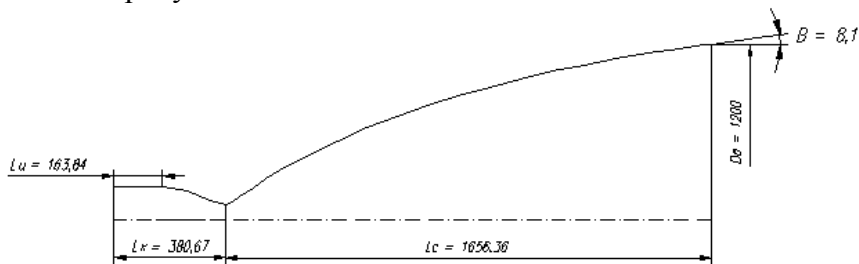


Рисунок 3.4 - Профиль камеры сгорания

3.3.5 Расчет охлаждения двигателя

Особенности охлаждения камеры сгорания ЖРД. Защита стенок камеры ЖРД от опасного перегрева – одна из самых важных и сложных проблем ракетной техники. Организация надежной защиты стенок современных высоконапряженных камер сгорания при небольших потерях удельного импульса – одна из трудных задач, возникающих при создании новых конструкций. Сложность проблемы защиты стенок современных камер ЖРД связана с тем, что продукты сгорания имеют высокие температуры (3500-4500 К), высокое давление и скорости движения ($a_{кр} = 1000 \div 1300 \text{ м/с}$). Разность температур между поверхностями стенки, несмотря на малую ее толщину, может достигать огромных величин. Между газом и стенкой возникает интенсивный теплообмен, способный при недостаточной защите быстро нагреть стенку КС до температуры близкой к температуре газов. Если учесть, что большинство материалов стенки допускают весьма умеренные нагревы (1300-1500 К), то сложность проблемы становится очевидной.

В соответствии с основными понятиями теории теплообмена, тепловой поток q_{Σ} передаваемый от газа в стенку, в общем случае складывается из конвективного q_k и лучистого q_l тепловых потоков:

$$q_{\Sigma} = q_k + q_l \quad (3.45)$$

Максимум теплового потока главным образом из-за влияния конвективной части достигается в дозвуковой части сопла, вблизи критического сечения. Характер распределения и величина суммарного теплового потока в основном определяется конвективной составляющей. Наиболее напряженным местом является входная часть сопла и особенно критическое сечение, которое имеет максимальный тепловой поток и по-

этому нуждается в наибольшей защите. Максимальная численная величина теплового потока в критическом сечении в основном определяется конвективной составляющей.

Наименее напряженный участок - конец сопла. Здесь тепловые потоки могут составить 0,1 от потоков в критическом сечении. Поэтому теплозащита конца сопла может быть облегченной.

Тепловые потоки в КС могут составлять $0,3 \div 0,5$ и более от потоков в критическом сечении, поэтому она по теплозащите может занимать близкое положение к критическому сечению.

Для предупреждения опасного перегрева огневой оболочки КС и защиты ее от разрушения в современных ЖРД применяют теплозащиту: наружное проточное, внутреннее, транспирационное (испарительное) охлаждение стенок, а также наружное радиационное охлаждение стенки, теплозащитные термостойкие покрытия, теплозащитные аблирующие покрытия, емкостное охлаждение.

Все перечисленные методы защиты стен или ЖРД применяются на практике, причем в большинстве случаев комплексно, совместно дополняя друг друга.

Несмотря на большое разнообразие схем защиты стенки КС в ЖРД наиболее распространенным является проточное наружное охлаждение совместно с внутренним.

Для охлаждения необходимо применять один из компонентов, так как наличие на борту ЛА специального охладителя нерационально. На организацию охлаждения влияет также род топлива, тип и назначение двигателя.

При работе ЖРД на низкокипящих компонентах организация наружного охлаждения стенок камеры усложняется. Охладитель, поступая в охлаждающий тракт, быстро превращается в пар и дальнейшее охлаждение происходит уже холодным паром. Задача надежного охлаждения стенок камеры

двигателя при этом сильно усложняется по следующим причинам:

1) при переходе охладителя из жидкого состояния в газообразное коэффициенты теплоотдачи от стенок к газу меньше, чем от стенки к жидкости;

2) удельный объем газообразного охладителя значительно больше, чем жидкого и сильно увеличивается с ростом температуры (в 2-3 раза), поэтому площадь сечения охлаждающего тракта должна быть переменной по длине для того, чтобы в каждом сечении тракта скорость охлаждающей жидкости была такой, чтобы обеспечивать требуемое значение $\alpha_{жс}$ соответствующее поступающему тепловому потоку;

3) решение задачи усложняется еще и тем, что при условиях, имеющих место в ЖРД охлаждение стенок камеры низкокипящими компонентами происходит в околокритической и сверхкритической области. При этом в околокритической области происходит резкое изменение физических свойств охладителя, что оказывает сильное влияние на теплообмен. Так, например, теплоемкость водорода в околокритической области увеличивается в $5 \div 10$ раз.

В проектируемом двигателе в качестве охладителя используется СПГ.

Применение кислорода, как охладителя представляется затруднительным. Это обусловлено повышенной активностью кислорода по отношению к металлам.

Наиболее теплонпряженные участки изготавливают из бронзы БРХ08, имеющей высокий коэффициент теплопроводности ($\lambda = 250$ Вт/м·К).

Далее использованы обозначения:

T_k - температура в камере;

$T_{г.ст}$ - температура стенки со стороны горячих газов;

$T_{жс.ст}$ - температура стенки камеры со стороны жидкости (охладителя);

$T_{ж}$ - температура охладителя.

Тепло путем конвективного и лучистого теплообмена передается от горячих продуктов сгорания к стенке камеры. Таким образом, суммарный удельный тепловой поток от горячих газов к стенке камеры двигателя q_{Σ} складывается из двух тепловых потоков:

$$q_{\Sigma} = q_{к} + q_{л}.$$

Благодаря теплопроводности стенки тепло передается через стенку камеры:

$$q_{\Sigma} = \frac{\lambda}{\delta_{ст}} (T_{г.ст} - T_{ж.ст}), \quad (3.46)$$

где λ - теплопроводность стенки;

$\delta_{ст}$ - толщина стенки.

Путем конвекции тепло передается от стенки охладителю:

$$q_{\Sigma} = \alpha_{ж} (T_{г.ст} - T_{ж.ст}), \quad (3.47)$$

где $\alpha_{ж}$ - коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости.

Методы расчета охлаждения даны в работах [2,3,5,6].

Внутреннее охлаждение. Чтобы обеспечить приемлемую температуру стенки, необходимо помимо наружного охлаждения применить и внутреннее. В этом случае температура стенки снижается либо благодаря защите ее жидкостной пленкой, либо газовым слоем с пониженной по сравнению с ядром потока температурой. Такой слой называется пристеночным. Температура этого слоя снижается за счет обогащения его одним из компонентов, как правило, горючим. Избыток горючего подается либо через периферийные форсунки, либо через пояса завесы, которые располагаются в различных местах камеры сгорания. В данном случае целесообразно применение периферийных форсунок.

Недостатком является резкое ухудшение их эффективности при увеличении длины камеры сгорания, что происходит в основном из-за отрыва пристеночного слоя. Для защиты камер возможно использование термостойких покрытий в сочетании с наружным охлаждением. Это позволяет увеличить допустимую температуру стенки.

Покрытие должно удовлетворять следующим требованиям:

- высокая температура плавления;
- стойкость к тепловым ударам;
- низкая теплопроводность;
- коэффициент линейного расширения близкий по значению коэффициенту линейного расширения основного материала;
- хорошая адгезия к основному материалу и хорошие антикоррозионные свойства.

Расчет лучистого теплового потока. Все тела, имеющие отличную от нуля температуру, излучают энергию в виде электромагнитных волн. Наибольшей излучательной способностью обладают многоатомные газы, входящие в состав продуктов сгорания. В камере сгорания тепловой поток, получаемый стенкой за счет излучения, определяется формулой, соответствующей закону Стефана-Больцмана

$$q_n = c_0 \left[\varepsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \varepsilon_{ст.эф} \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.48)$$

где $\varepsilon_{ст.эф}$ - эффективная степень черноты стенки;

c_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

T_g - температура газа;

T_{cm} - температура газовой стенки;

ε_g - степень черноты продуктов сгорания.

Расчет наружного охлаждения. Для расчета наружного охлаждения необходимо знать:

- схему охлаждения,
- геометрию охлаждающего тракта,
- расход охладителя,
- конструкционные материалы.

Камера и сопло разбивается на некоторое количество участков, в пределах которых параметры считаются постоянными. Расчет охлаждения производится методом последовательных приближений и ведется в следующем порядке:

1) Определяются осредненные значения диаметра, а также длина участка. Определяем все параметры, которые характеризуют теплонапряженность оболочки камеры сгорания в центре каждого участка.

2) Рассчитывается геометрия охлаждающего тракта.

Средний диаметр участка:

$$D_{cpi} = D + 2\delta_{cm} + h, \quad (3.49)$$

где D_{cpi} - средний диаметр для каждого участка;

D - внутренний диаметр оболочки сопла;

δ_{cm} - толщина внутренней оболочки;

h - высота охлаждающего тракта.

Шаг ребер

$$t = \frac{\pi D_{cpi}}{n_p} \cos \alpha, \quad (3.50)$$

где n_p - число ребер;

α - угол закрутки.

Средний гидравлический диаметр

$$d_2 = \frac{2h(t - \delta_p)}{t - S_p + h}, \quad (3.51)$$

где δ_p - толщина ребра.

3) Определяется температура СПГ на входе в охлаждающий тракт с учетом подогрева его в насосе.

4) По температуре охладителя и геометрии при заданном расходе охладителя, задаемся в первом приближении температурой стенки со стороны охладителя $T_{ст.к.}$ и определяем коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости $\alpha_{жс}$ по формуле

$$\alpha_{жс} = \beta \left(\frac{\dot{m}_c}{F} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_z} \right)^{0,2}, \quad (3.52)$$

где β - комплекс, характеризующий теплофизические свойства охладителя и его давление (определяется из справочника).

F - проходная площадь тракта.

5) Коэффициент эффективности оребрения охлаждающего тракта рассчитывается по формуле

$$\eta_\alpha = \frac{1}{t} \left[t - S_p + \frac{2th(mh)}{m} \right], \quad (3.53)$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_{жс}}{\lambda_{ст} \delta_p}},$$

где $\lambda_{ст}$ - теплопроводность материала оребренной стенки.

6) Определяются удельные конвективные тепловые потоки на каждом участке q_k методом пересчета с эталонного двигателя по формуле

$$q_{ко} = q_{кэ} \left(\frac{P_{ко}}{P_{кэ}} \right)^{0,85} \left(\frac{D_{нр.эм}}{D_{нр.о}} \right)^{0,15} \frac{S_0}{S_{0эм}}, \quad (3.54)$$

где $q_{ко}$, $q_{кэ}$ - удельные тепловые конвективные тепловые потоки в сходственных сечениях рассчитываемой и эталонной

камеры ($\bar{D} = \frac{D}{D_{кр}}$ - средний безразмерный диаметр участка);

S_0 и $S_{0эп}$ - комплексы, характеризующие энергетические и теплофизические свойства топлива в зависимости от соотношения компонентов и $T_{см.г}$. Тогда уравнение для конвективного потока (24) можно переписать:

$$\frac{q_{ко}}{q_{к.эп}} = \kappa \frac{S_0}{S_{эп}} .$$

С другой стороны, конвективный поток определяется по следующей формуле

$$q_{ко} = \frac{T_{см.г} - T_{жс}}{\frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\alpha_{жс\eta p}}} - q_l . \quad (3.55)$$

Разделив обе части уравнения на $q_{эп}$ получим

$$\frac{q_{ко}}{q_{эп}} = \frac{1}{q_{эп}} \left(\frac{T_{см.г} - T_{жс}}{\frac{S_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_{жс}\eta p}} - q_l \right)$$

Чтобы определить действительные конвективные удельные тепловые потоки систему уравнений решают графически.

7) Определяется температура стенки камеры сгорания со стороны охладителя:

$$T_{см.к} = T_{см.г} - \frac{\delta_{см}}{\lambda} \cdot q_{\Sigma} \quad (3.56)$$

8) Эту температуру сравниваем с той, которой мы задавались ранее. Если разница между ними составляет больше 5%, то расчет необходимо повторить со второго пункта.

Определяется подогрев охладителя на участке:

$$\Delta T = \frac{q_{\Sigma} \cdot \Delta F}{3600 \dot{m} c_p}, \quad (3.57)$$

где ΔF - поверхность нагрева i -го участка камеры;

\dot{m} - расход охладителя;

c_p - средняя теплоемкость охладителя, взятая при температуре:

$$T_{cp} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2} \quad (3.58)$$

9) Температура охладителя на следующем участке:

$$T_{ж.н} = T_{ж.н-1} + \Delta T_n \quad (3.59)$$

10) Гидравлические потери на каждом участке охлаждающего тракта:

$$\Delta P_i = \xi_i \frac{\Delta l_i}{d_c} \cdot \frac{\gamma_i W_i}{2g}, \quad (3.60)$$

где ξ_i - коэффициент потерь, определяемый по [5];

Δl_i - длина участка по образующей;

γ - плотность охладителя;

W - скорость охладителя.

Результаты расчета охлаждения двигателя приведены в таблицах 3.10 - 3.12 и представлены в виде графиков на рисунках 3.5 - 3.8.

В таблицах использованы следующие обозначения:

№ – номер сечения

d_s – диаметр середины сечения, мм

d_k – диаметр конца сечения, мм

xs – осевая координата середины сечения, мм
xk – осевая координата конца сечения, мм
dx – длина сечения по оси, мм
dl – длина сечения по образующей, мм
Sb – площадь боковой поверхности, m^2
Nr – число ребер
cos – косинус угла закрутки
fl – площадь в свету по охладителю, m^2
dst – толщина стенки, мм
dp – ширина паза, мм
dr – толщина ребра, мм
hr – высота ребра, мм
dg – диаметр гидравлический паза, мм
шст – шероховатость стенки, мкм
шг – шероховатость ребра, мкм
шгуб – шероховатость рубашки, мкм
Мах – число Маха
dpodl – толщина подложки, мкм
dtzp – толщина ТЗП, мкм
Mat – материал огневой стенки
ml – расход охладителя, кг/с
get – эталонный тепловой поток, $ккал/м^2$
al – коэффициент теплоотдачи, $ккал/м^2$
eal – коэффициент оребрения
est – интенсификация теплообмена на ребре
S – параметр S

α_{ps} – коэффициент избытка окислителя на стенке

q_l – лучистый тепловой поток, 10^6 Вт/м^2

Q_s – полный тепловой поток, 10^6 Вт/м^2

T_{wg} , T_{wpp} , T_{wl} , T_{wg} – температура огневой стенки на газовой поверхности, под покрытием, со стороны охладителя, на пайке ребра с рубашкой, К

T_l – температура охладителя, К

dT_l – подогрев охладителя, К

dPl – гидросопротивление участка, кгс/см^2

Pl – давление в охладителе, кгс/см^2

w_l – скорость охладителя, м/с

Условия работы:

$Pk=120.0$; $Km=3.40$; $kps=2.50$; $kstex=3.990$; $ml0=12.290$;
 $Pl.vx=127.0$; $Pl.vx=347.0$ $Du=58.00$; $mju.u=0.85$; $cge=1.200$;
 $cgkol=0.500$; $kgeom=1.0000$.

$Th2k=20.0$; $Tgef=4150.7$; $Rgef=45.41$; $dlef=2015.2$;
 $twget=1000.0$; $apset=1.000$; $setl=3.656$ s ; $MwC=54558.0$
 Дж/К ; $Sbs=4.741$; $SLs=15.500 \text{ м}^2$.

Материалы: Зона критики БрХ0.8-кр. сопло Я1Т.

Таблица 3.10

ii	ml	get	al	eal	est	ereb	s	aps	gl	Qs	Twg
1	12,29	45,78	27675	1,94	1	1	0,981	0,094	0,731	12,82	441
2	12,29	45,78	29523	2,13	1,04	1,04	2,423	0,627	1,238	31,48	771
3	12,29	36,21	30300	2,13	1,07	1,07	2,52	0,627	1,913	26,74	689
4	12,29	32,8	24436	2,22	1,06	1,06	2,484	0,627	2,251	24,47	719
5	12,29	30,83	24664	2,24	1,08	1,08	2,509	0,627	2,251	23,31	697
6	12,29	29,47	24835	2,25	1,09	1,09	2,5424	0,627	2,251	22,51	684
7	12,29	28,46	24988	2,26	1,1	1,1	2,524	0,627	2,251	21,9	676
8	12,29	27,65	25135	2,28	1,12	1,12	2,534	0,627	2,251	21,4	669
9	12,29	26,99	25287	2,29	1,13	1,13	2,541	0,627	2,251	20,98	665
Цилиндрическое сечение											
10	12,29	26,48	25503	2,29	1,14	1,14	2,546	0,627	2,251	20,66	662
11	12,29	26,7	26281	2,3	1,15	1,15	2,55	0,627	2,251	20,81	661
12	12,29	27,57	27607	2,32	1,16	1,16	2,55	0,627	2,251	21,4	663
13	12,29	28,18	28749	2,33	1,18	1,18	2,548	0,627	2,251	21,81	664
14	12,29	31,83	25359	1,88	1,17	1,17	2,547	0,627	2,251	22,89	810
15	12,29	35,93	29347	1,89	1,2	1,2	2,375	0,627	2,251	25,52	810

Продолжение таблицы 3.10											
16	12,29	42,4	36463	1,88	1,24	1,24	2,377	0,627	2,251	29,7	809
17	12,29	53,16	50797	1,85	1,3	1,3	2,375	0,627	2,251	36,69	809
18	12,29	69,55	79412	1,8	1,38	1,38	2,377	0,627	2,017	47,05	810
19	12,29	82,07	111294	1,75	1,45	1,45	2,377	0,627	1,536	54,69	811
20	12,29	84,55	121564	1,74	1,48	1,48	2,375	0,627	1,439	56,16	812
21	12,29	84,54	123680	1,74	1,49	1,49	2,373	0,627	1,407	56,13	812
Критическое сечение											
22	12,29	62,96	64762	1,99	1,37	1,37	2,373	0,627	1,388	42,12	810
23	12,29	36,66	44836	2,08	1,3	1,3	2,376	0,627	1,211	26,08	710
24	12,29	30,29	38782	2,06	1,28	1,28	2,495	0,627	0,984	21,78	686
25	12,29	26,31	31477	2,02	1,24	1,24	2,522	0,627	0,789	18,71	695
26	12,29	23,31	28322	1,98	1,23	1,23	2,512	0,627	0,63	16,55	688
27	12,29	21,04	25773	1,95	1,21	1,21	2,521	0,627	0,534	14,92	685
28	12,29	19,04	23669	1,91	1,2	1,2	2,524	0,627	0,468	13,5	682
29	12,29	17,11	21914	1,88	1,19	1,19	2,528	0,627	0,41	12,16	675
30	12,29	15,74	27307	1,27	1,22	1,22	2,536	0,627	0,36	9,62	998

Продолжение таблицы 3.10											
31	12,29	14,45	25130	1,27	1,21	1,21	2,149	0,627	0,316	8,91	980
32	12,29	11,71	20400	1,27	1,17	1,17	2,177	0,627	0,217	7,37	926
33	12,29	6,56	14480	1,25	1,12	1,12	2,237	0,627	0,12	4,41	782
34	12,29	4,57	16076	1,31	1,13	1,13	2,408	0,627	0,08	3,23	663
35	12,29	3,35	11587	1,3	1,08	1,08	2,548	0,627	0,04	2,37	641
36	12,29	2,57	10332	1,28	1,07	1,07	2,574	0,627	0,029	1,84	609
37	12,29	2,09	8978	1,26	1,05	1,05	2,611	0,627	0,02	1,5	598
38	12,29	1,72	8251	1,25	1,03	1,03	2,624	0,627	0,016	1,24	584
39	12,29	1,5	7650	1,24	1,02	1,02	2,638	0,627	0,012	1,08	579
40	12,29	1,27	9379	1,36	1,04	1,04	2,643	0,627	0,01	0,93	540
41	12,29	1,13	8750	1,36	1,03	1,03	2,684	0,627	0,008	0,82	539
42	12,29	1,01	8256	1,35	1,02	1,02	2,686	0,627	0,007	0,74	539
43	12,29	0,91	7861	1,34	1,01	1,01	2,685	0,627	0,006	0,66	539
44	12,29	0,83	7543	1,34	1,01	1,01	2,686	0,627	0,005	0,61	540
45	12,29	0,77	7286	1,33	1	1	2,685	0,627	0,005	0,56	542
46	12,29	0,72	7078	1,33	1	1	2,683	0,627	0,005	0,53	544

Продолжение таблицы 3.10											
47	12,29	0,68	6911	1,33	1	1	2,681	0,627	0,004	0,5	546
48	12,29	0,65	6799	1,33	1	1	2,678	0,627	0,004	0,47	548
ii	Twpp	Twl	Twr	Tl	dtl	dPl	P1	Qss%	dPd	wl	
1	441	366	174	127	2,54	1,3	346,6	0,72	0,596	16,5	
2	771	630	271	129,5	12,41	0,38	345,3	4,26	0,924	20,6	
3	689	557	250	142	10,57	0,4	345	7,26	0,956	21,3	
4	719	603	268	152,5	9,7	0,21	344,6	10,01	0,64	17,7	
5	697	583	267	162,2	9,25	0,22	344,4	12,63	0,659	18,2	
6	684	574	269	171,5	8,9	0,23	344,1	15,17	0,678	18,8	
7	676	568	272	180,4	8,62	0,23	343,9	17,63	0,698	19,3	
8	669	563	276	189	8,39	0,24	343,7	20,03	0,718	19,8	
9	665	560	280	197,4	8,16	0,25	343,4	22,39	0,739	20,4	
Цилиндрическое сечение											
10	662	559	285	205,5	8,26	0,27	343,2	24,79	0,765	21,1	
11	661	558	287	213,8	7,94	0,29	342,9	27,12	0,829	22,3	
12	663	556	288	221,7	7,8	0,34	342,6	29,43	0,935	24,1	

Продолжение таблицы 3.10										
13	664	555	291	229,5	8,28	0,41	342,3	31,89	1,035	25,8
14	810	718	407	237,8	7,86	0,2	341,9	34,24	1,01	25,9
15	810	706	396	245,7	8,27	0,31	341,7	39,46	1,414	31,2
16	809	686	383	254	9,03	0,61	341,4	42,5	2,318	40,7
17	809	653	371	263	10,1	1,69	340,8	45,56	4,908	60,3
18	810	602	361	273,1	10,23	5,85	339,1	48,59	13,483	102,3
19	811	565	357	283,3	10,17	15,27	333,2	50,1	29,357	155,2
20	812	559	362	293,5	5,06	10,38	314,9	50,55	37,743	182,4
21	812	559	364	298,5	1,49	3,38	307,6	51,72	40,65	193,4
Критическое сечение										
22	810	627	339	300	3,92	1,92	3604,2	62,6	9,51	94,3
23	710	584	330	304	2,96	0,76	302,3	53,44	4,204	63,2
24	686	579	339	306,9	2,84	0,5	301,5	54,25	3,106	54,7
25	695	604	346	309,7	2,73	0,26	301	55,04	1,989	44
26	688	607	355	312,5	2,67	0,19	300,7	55,82	1,587	39,5
27	685	612	364	315,1	2,64	0,14	300,5	56,58	1,295	35,9

Продолжение таблицы 3.10										
28	682	616	373	317,8	2,59	0,11	300,4	57,32	1,077	32,9
29	675	615	380	320,4	2,52	0,09	300,3	57,94	0,911	30,4
30	1003	601	323	322,9	2,13	0,24	300,2	58,55	1,224	35,4
31	980	604	325	325	2,1	0,18	300	61,49	1,028	32,6
32	926	611	327	327,1	10,07	0,47	299,8	65,63	0,659	26,2
33	782	581	338	337,2	14,33	0,29	299,3	70	0,318	18,5
34	663	505	352	351,5	15,32	0,68	299	73,51	0,34	19,7
35	641	525	368	366,8	12,49	0,2	298,3	76,77	0,171	14,4
36	609	518	381	379,3	11,75	0,15	298,1	79,67	0,135	13,2
37	598	523	393	391,1	10,57	0,09	298	82,28	0,101	11,7
38	584	522	404	401,6	9,57	0,07	297,9	84,7	0,084	11
39	579	525	414	411,2	8,88	0,06	297,8	86,93	0,071	10,2
40	540	493	421	420,1	8,11	0,14	297,8	89	0,094	11,8
41	539	498	429	428,2	7,5	0,12	297,6	90,94	0,081	11,1
42	539	502	437	435,7	7,02	0,1	297,5	82,75	0,072	10,5
43	539	506	444	442,7	6,53	0,08	297,4	89	0,065	10

Продолжение таблицы 3.10										
44	540	509	451	449,3	6,14	0,07	297,3	94,47	0,059	9,7
45	542	514	457	455,4	5,86	0,07	297,3	96,47	0,055	9,4
46	544	517	463	461,3	5,57	0,06	297,2	97,67	0,052	9,2
47	546	521	468	466,8	5,38	0,05	297,1	99,18	0,049	9
48	548	524	474	472,2	2,92	0,03	297,1	100	0,048	8,9

Таблица 3.11

ii	ds	dk	xs	xk	dx	dl	sb	Nr	cos	fl
1	221	221	5	10	10	10	0,0069	280	1	0,001733
2	221	221	20	30	20	20	0,0139	280	1	0,001397
3	221	221	40	50	20	20	0,0139	280	1	0,001397
4	221	221	60	70	20	20	0,0139	280	1	0,001733
5	221	221	80	90	20	20	0,0139	280	1	0,001733
6	221	221	100	110	20	20	0,0139	280	1	0,001733
7	221	221	120	130	20	20	0,0139	280	1	0,001733
8	221	221	140	150	20	20	0,0139	280	1	0,001733
9	221	221	160	170	20	20	0,0139	280	1	0,001733
Цилиндрическое сечение										
10	220,7	219,3	180,4	190,7	20,7	20,7	0,0144	280	1	0,001729

Продолжение таблицы 3.11										
11	217,4	214,3	200,7	210,7	20	20,2	0,0138	280	1	0,001687
12	211,6	210,7	220,7	230,7	20	20	0,0133	280	1	0,001614
13	207,2	199,5	240,7	250,7	20	21,4	0,014	280	1	0,001559
14	192,1	185,5	260,7	270,7	20	21,1	0,0127	140	1	0,001607
15	178,2	170,2	280,7	290,7	20	21,6	0,0121	140	1	0,001382
16	161,3	151,3	300,7	310,7	20	22,4	0,0113	140	1	0,001099
17	141,1	129,6	320,7	330,7	20	23,1	0,0102	140	1	0,00077
18	120,3	113,1	340,7	350,7	20	21,3	0,008	140	1	0,000475
19	108,2	105,7	360,7	370,7	20	20,2	0,0069	140	1	0,000331
20	105,3	104,3	367,7	377,7	7	10	0,0033	140	1	0,000303
Критическое сечение										
21	104,3	104,3	370,7	380,7	3	3	0,001	140	1	0,000298
22	105,1	107,9	388,7	390,7	10	10,4	0,0034	140	1	0,000621
23	113,5	119,6	398,7	400,7	10	11,7	0,0042	140	1	0,000942
24	126,3	133,1	408,7	410,7	10	12,1	0,0048	140	1	0,001103
25	139,9	146,8	418,7	420,7	10	12,1	0,0053	140	1	0,001386
26	153,7	160,7	428,7	430,7	10	12,2	0,0059	140	1	0,001559
27	167,7	174,7	438,7	440,7	10	12,2	0,0064	140	1	0,001735
28	181,8	188,8	448,7	450,7	10	12,2	0,007	140	1	0,001911
29	195,8	202,8	458,7	460,7	10	12,2	0,0075	140	1	0,02088
30	209,7	216,6	468,7	470,7	10	12,1	0,008	280	1	0,00181

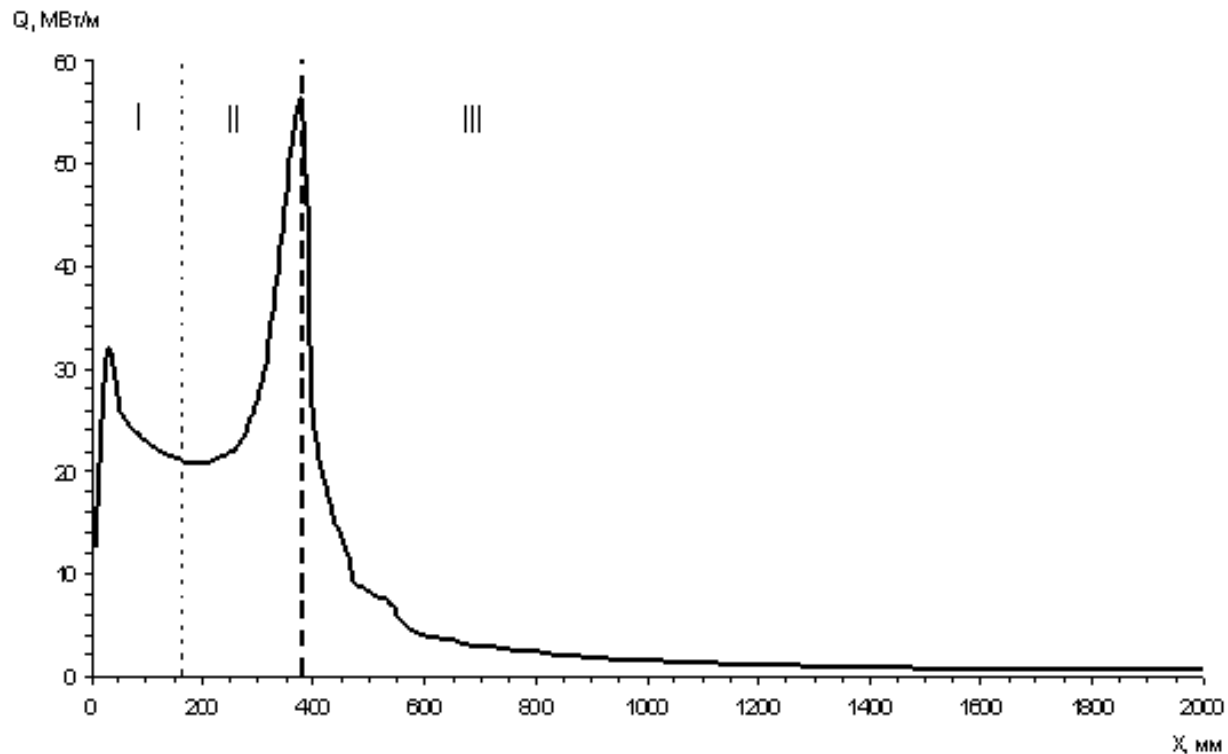
Продолжение таблицы 3.11										
31	223,5	230,3	478,7	480,7	10	12,1	0,0085	280	1	0,001983
32	263,6	295,7	508,7	530,7	50	59,4	0,0492	280	1	0,002487
33	365,3	383,4	583,7	580,7	50	103,6	0,116	280	1	0,003651
34	426,2	500,6	683,7	680,7	100	124,6	0,1669	560	1	0,003634
35	558,4	587,8	783,7	780,7	100	104,2	0,1828	560	1	0,005295
36	624,1	674	883,7	880,7	100	111,8	0,2191	560	1	0,006121
37	717,6	752,5	983,7	980,7	100	105,9	0,2388	1120	1	0,007296
38	785,9	817,8	1083,7	1080,7	100	105	0,2591	1120	1	0,008154
39	848,4	877,7	1183,7	1180,7	100	104,2	0,2778	1120	1	0,00894
40	905,9	932,9	1283,7	1280,7	100	103,6	0,2948	1120	1	0,00787
41	958,8	983,6	1383,7	1380,7	100	103	0,3103	1120	1	0,008535
42	1007,2	1029,7	1483,7	1480,7	100	102,5	0,3243	1120	1	0,009143
43	1051,1	1071,5	1583,7	1580,7	100	102,1	0,337	1120	1	0,009695
44	1090,8	1109,1	1683,7	1680,7	100	101,7	0,3484	1120	1	0,010194
45	1126,3	1142,5	1783,7	1780,7	100	101,3	0,3585	1120	1	0,01064
46	1157,7	1171,5	1883,7	1880,7	100	101	0,3672	1120	1	0,011034
47	1185,1	1198,4	1983,7	1980,7	100	100,9	0,3756	1120	1	0,011379
48	1205,7	1212,9	2012,1	2037,04	56,3	56,8	0,215	1120	1	0,011637

Таблица 3.12

ii	dst	dp	dr	hr	dg	mst	mr	rub	Max
1	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
2	1	1,25	1,3	4	1,9	10	10	10	0,134
3	1	1,25	1,3	4	1,9	10	10	10	0,134
4	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
5	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
6	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
7	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
8	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
9	1	1,55	1	4	2,23	10	10	10	0,134
Продолжение таблицы 3.12									
Цилиндрическое сечение									
10	1	1,54	1	4	2,23	10	10	10	0,134
11	1	1,51	1	4	2,19	10	10	10	0,138
12	1	1,44	1	4	2,12	10	10	10	0,146
13	1	1,39	1	4	2,07	10	10	10	0,153
14	1	3,43	1	3,35	3,39	10	10	10	0,178
15	1	3,11	1	3,17	3,14	10	10	10	0,209
16	1	2,73	1	2,88	2,8	10	10	10	0,258
17	1	2,27	1	2,43	2,34	10	10	10	0,347
18	1	1,79	1	1,9	1,84	10	10	10	0,515

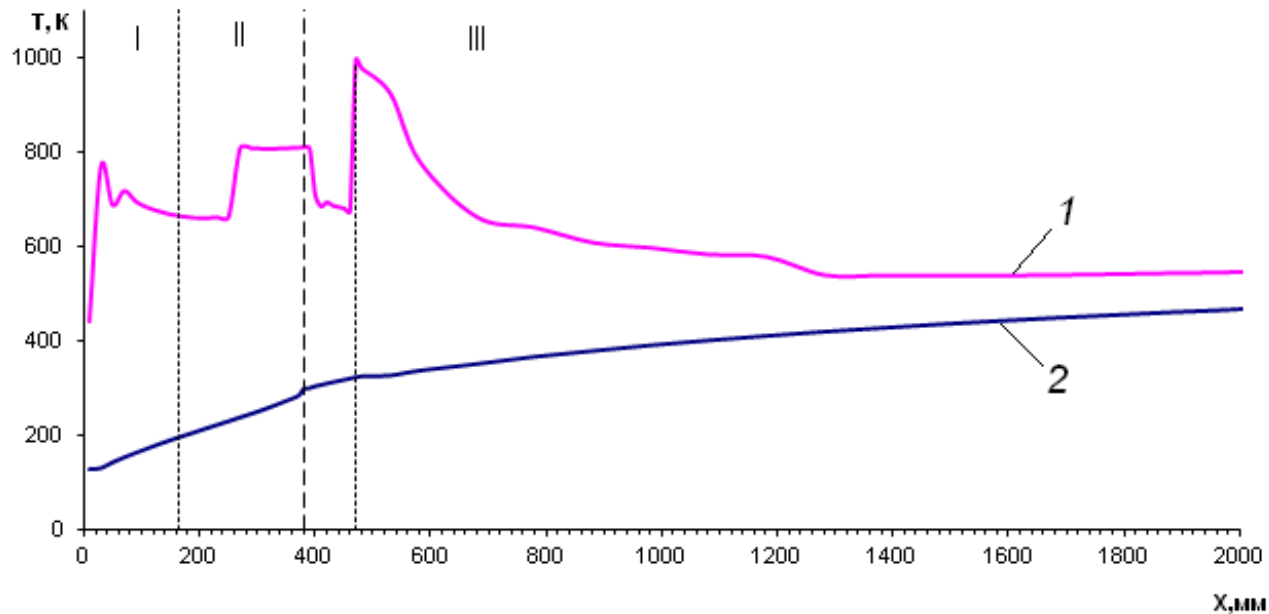
Продолжение таблицы 3.12									
19	1	1,51	1	1,57	1,54	10	10	10	0,736
20	1	1,44	1	1,5	1,47	10	10	10	0,861
21	1	1,42	1	1,5	1,46	10	10	10	1
Критическое сечение									
22	1	1,47	1	3,01	1,98	10	10	10	1,542
23	1	1,68	1	4	2,37	10	10	10	2,027
24	1	1,97	1	4	2,64	10	10	10	2,176
25	1	2,47	0,8	4	3,06	10	10	10	2,282
26	1	2,78	0,8	4	3,28	10	10	10	2,371
27	1	3,1	0,8	4	3,49	10	10	10	2,445
28	1	3,41	0,8	4	3,68	10	10	10	2,515
29	1	3,73	0,8	4	3,86	10	10	10	2,587
30	0,8	1,62	0,8	4	2,3	10	10	10	2,644
31	0,8	1,77	0,8	4	2,45	10	10	10	2,701
32	0,8	2,22	0,8	4	2,86	10	10	10	2,837
33	0,8	3,26	0,8	4	3,59	10	10	10	3,19
34	0,8	1,62	0,8	4	2,31	10	10	10	3,4
35	0,8	2,36	0,8	4	2,97	10	10	10	3,59
36	0,8	2,73	0,8	4	3,25	10	10	10	3,74
37	0,8	3,26	0,8	4	3,59	10	10	10	3,86
38	0,8	3,64	0,8	4	3,81	10	10	10	3,97

Продолжение таблицы 3.12									
39	0,8	3,99	0,8	4	4	10	10	10	4,05
40	0,8	1,76	0,8	4	2,44	10	10	10	4,14
41	0,8	1,91	0,8	4	2,58	10	10	10	4,21
42	0,8	2,04	0,8	4	2,7	10	10	10	4,27
43	0,8	2,16	0,8	4	2,81	10	10	10	4,33
44	0,8	2,28	0,8	4	2,9	10	10	10	4,38
45	0,8	2,37	0,8	4	2,98	10	10	10	4,42
46	0,8	2,46	0,8	4	3,05	10	10	10	4,46
47	0,8	2,54	0,8	4	3,11	10	10	10	4,49
48	0,8	2,6	0,8	4	3,15	10	10	10	4,518



I – Цилиндрическая часть камеры; II – Сужающаяся часть; III – Сопло

Рисунок 3.5 - Тепловые потоки в камере $Q, \text{ MWt/m}^2 = F(X[\text{мм}])$



1 – T_{wg} температура огневой стенки

2 – T_l – температура охладителя

Рисунок 3.6 - Изменение температуры по длине камеры

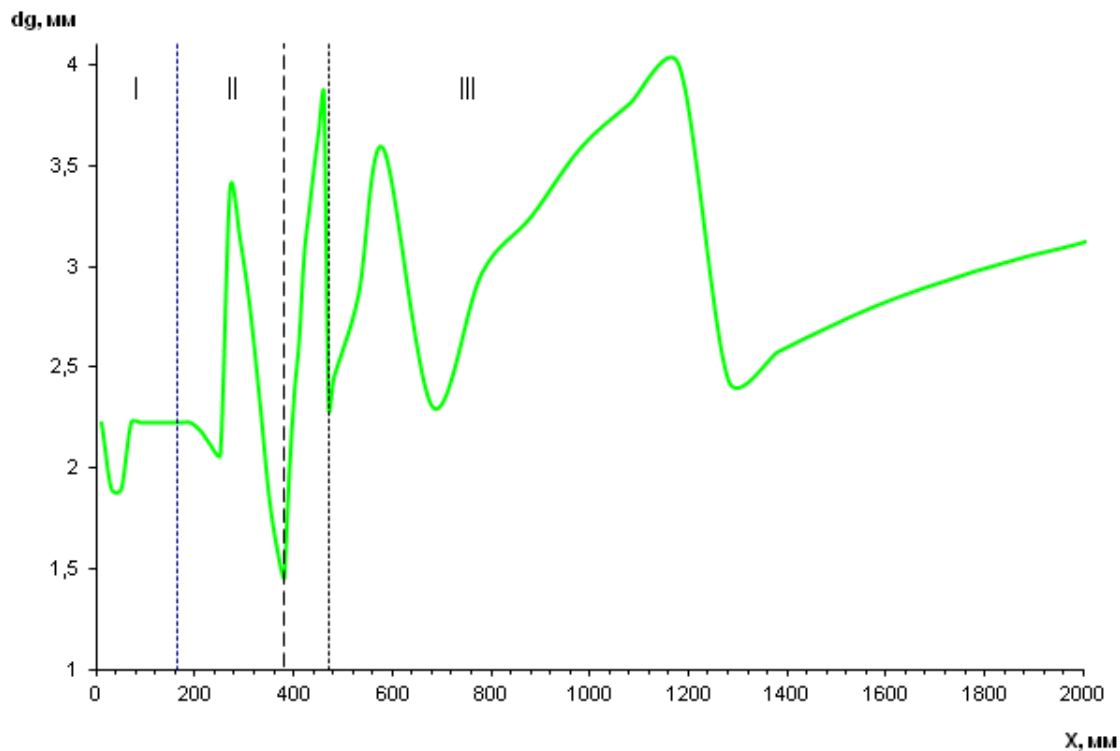


Рисунок 3.7 - Изменение гидравлического диаметра канала по длине камеры

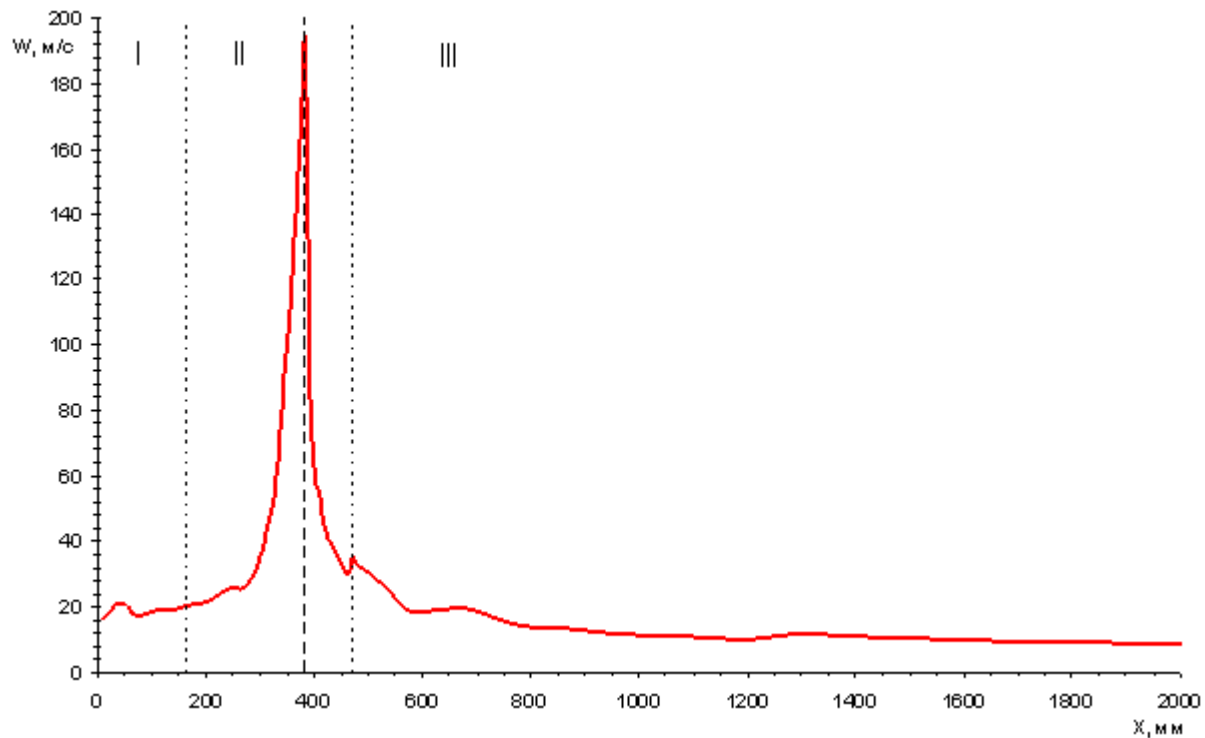


Рисунок 3.8 - Скорость охладителя по длине камеры

3.4 Расчет параметров турбонасосных агрегатов

Для подачи компонентов топлива в камеру сгорания и газогенератор в проектируемом двигателе применен турбонасосный агрегат, выполненный по одновальной схеме, состоящий из двухступенчатого насоса окислителя, двухступенчатого насоса горючего и двухступенчатой турбины. Для обеспечения высоких кавитационных качеств агрегатов подачи компонентов топлива в двигателе применены бустерные турбонасосные агрегаты.

В принятой двухблочной схеме системы подачи компонентов выбран насос окислителя, состоящий из шнекоцентробежной камерной и центробежной генераторной ступеней. Крыльчатка камерной ступени имеет двухсторонний вход. Подвод кислорода на вход крыльчаток камерной и генераторной ступеней осуществляется от одного трубопровода.

В насосе окислителя использована трёхпоточная схема: двухпоточная для камерной ступени и однопоточная для газогенераторной. Наряду с применением предвключённых шнеков на входе в центробежные крыльчатки это позволяет за счёт снижения расхода через камерную ступень максимально снизить требуемое давление на входе в насос при заданном значении КПД.

Выбрана схема с полноразмерной генераторной ступенью насоса окислителя. При этом на ней возможно размещение автомата осевой разгрузки с диапазоном действия, достаточным для компенсации нерасчетных нагрузок.

Насос горючего выбран двухступенчатым с предвключенным шнеком перед первой ступенью. Двухступенчатый насос горючего, в котором окружные скорости рабочих колес существенно ниже, чем в одноступенчатом варианте более предпочтителен для многократного использования

Исходные данные и результаты расчета насоса окислителя приведены в таблицах 3.13 – 3.15.

Таблица 3.13 – Основные параметры насосов

Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
	1 ступень	2 ступень	1 ступень	2 ступень
Давление (полное), атм:				
-на входе	10.40	180.52	10.30	224.90
-на выходе	180.52	351.34	224.90	368.05
Температура, К:				
-на входе	110.5	118.3	92.0	102.2
-на выходе	118.3	126.5	102.2	119.6
Плотность, кг/м ³	426.49	430.06	1128.99	1126.67
Массовый расход через насос, кг/с	12.5	12.5	50.0	2.4
Объемный расход через насос, дм ³ /с	29.1991	28.9568	44.3193	2.1213
Напор насоса, м	3989	3972	1901	1271
Частота вращения ротора, об/мин	35000	35000	35000	35000
Коэффициент быстроходности	43.5	43.4	93.4	27.6
<u>Вход в шнек(параметры на среднем диаметре)</u>				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	11.23	-	15.67	-
Окружная скорость, м/с	84.30	-	91.63	-
Относительная скорость, м/с	85.04	-	92.96	-
Скорость потока в межлопаточном канале, м/с	60.43	-	66.72	-
Расходный параметр $q = C_m/(u \cdot \text{tg}(\beta))$	0.5201	-	0.5598	-
Угол атаки, град	6.78	-	7.28	-
<u>Выход из шнека(параметры на расчетном диаметре)</u>				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	13.31	-	17.79	-
Окружная скорость на расчетном диаметре, м/с	90.52	-	97.39	-
Теоретический напор, м	397.17	-	435.75	-
Гидравлические потери, м	122.61	-	148.45	-
Напор шнека, м	274.56	-	287.30	-
Статический напор, м	180.17	-	189.14	-

Продолжение таблицы 3.13				
Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
<i>Вход в крыльчатку</i>				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	20.47	20.90	17.21	2.89
Расходная составляющая абсолютной скорости с учетом загромождения, м/с	13.20	13.47	21.73	3.91
Окружная составляющая абсолютной скорости, м/с	47.23	47.23	38.86	58.30
Абсолютная скорость, м/с	51.48	51.65	42.50	58.37
Окружная скорость на среднем диаметре кромки, м/с	82.47	82.47	109.96	73.30
Относительная скорость, м/с	40.75	40.97	73.15	15.29
Угол потока в относительном движении, град	30.16	30.67	13.61	10.91
Угол потока с учетом загромождения, град	20.53	20.92	17.00	14.60
Угол атаки, град.	-0.16	-0.67	2.39	5.09
Угол атаки с учетом загромождения, град.	9.47	9.08	-1.00	1.40
<i>Выход из крыльчатки</i>				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	11.22	11.15	14.66	2.72
Расходная составляющая абсолютной скорости с учетом загромождения, м/с	11.69	11.60	16.78	3.08
Окружная составляющая абсолютной скорости, м/с	182.69	188.32	113.55	119.93
Абсолютная скорость, м/с	183.04	188.65	114.50	119.96
Абсолютная скорость с учетом загромождения, м/с	183.07	188.68	114.79	119.97
Окружная скорость на наружном диаметре, м/с	241.90	248.50	193.71	155.95
Относительная скорость, м/с	60.26	61.21	81.48	36.12
Угол потока в относительном движении, град	10.73	10.49	10.36	4.32
Гидравлические потери в крыльчатке, м	115.59	113.02	118.62	90.47

Продолжение таблицы 3.13				
Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
<u>Спиральный отвод</u>				
Скорость в минимальном сечении отвода, м/с	73.00	72.39	49.24	4.38
Суммарные потери в отводе, м	279.41	289.72	75.11	110.54
<u>Переднее уплотнение</u>				
Давление, атм:				
-на входе в уплотнение	95.04	263.34	123.66	293.58
-на выходе из уплотнения	18.08	180.52	31.65	224.90
Расход через уплотнение, дм ³ /с	1.83	2.41	2.43	0.55
<u>Заднее уплотнение</u>				
Давление, атм:				
-на входе в уплотнение	96.09	264.39	116.31	295.51
-на выходе из уплотнения	62.02	246.02	79.09	247.22
Расход через уплотнение, дм ³ /с	1.35	1.67	1.81	0.86
<u>Автомат осевой разгрузки</u>				
Давление, атм:				
-на среднем диаметре	60.19	244.18	77.23	243.83
-на входе в регулируемую щель	58.37	242.34	75.38	240.43
Продолжение таблицы 1.6				
-на выходе из регулируемой щели	19.29	181.87	36.98	227.59
Расход через щель, дм ³ /с	1.35	1.67	1.81	0.86
<u>Разгрузочные отверстия в крыльчатке</u>				
Давление, атм:				
-на входе в отверстия	18.53	185.20	32.17	236.38
-на выходе из отверстий (на среднем диаметре)	14.03	180.52	18.61	224.90
Расход через отверстия, дм ³ /с	1.53	1.86	1.92	0.96
<u>Диски крыльчатки</u>				
Мощность трения дисков крыльчатки, кВт:				
-основного	22.335	25.149	20.634	8.867
-покрывного	20.737	23.496	20.307	7.909
Мощность механических потерь, кВт	30.000	30.000	60.000	4.000

Продолжение таблицы 3.13				
Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
<u>Кавитационные параметры</u>				
<u>- Шнека -</u>				
Коэффициент кавитации шнека по 1-му режиму	0.1034	-	0.0704	-
Кавитационный запас шнека по 1-му режиму, м	47.76	-	49.82	-
Коэффициент кавитации шнека по 2-му режиму	0.0423	-	0.0323	-
Кавитационный запас по 2-му режиму, м	25.22	-	33.04	-
Коэффициент запаса по 2-му режиму	8.9870	-	2.4814	-
<u>- Колеса -</u>				
Коэффициент кавитации	0.7553	0.7710	0.2990	0.2663
Срывной кавитационный запас колеса, м	199.06	201.98	173.69	176.87
Кавитационный запас на входе в центробежное колесо (при $dh_{вх} = 0$), м	75.506	72.582	113.61	110.43
<u>Параметры ступени</u>				
Относительный расход $Q/n \cdot 10^7$, $м^3 \cdot мин / (с \cdot об)$	8.34	8.27	12.66	0.61
Относительный напор $H/n^2 \cdot 10^7$, $м \cdot мин^2 / об^2$	32.56	32.42	15.52	10.37
Гидравлическая мощность насоса, кВт	610.59	613.05	1196.2	59.106
Потребляемая насосом мощность, кВт	683.67	691.69	1297.2	79.882
<u>КПД насоса:</u>				
-гидравлический	0.8851	0.9079	0.8474	0.8634
-объемный	0.9011	0.8712	0.9198	0.5834
-дисковый	0.9341	0.9265	0.9669	0.7789
-механический	0.9561	0.9566	0.9537	0.9499
-суммарный	0.7123	0.7011	0.7188	0.3727

Продолжение таблицы 3.13				
Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
<u>Осевые силы</u>				
Сила на покрывающий диск	12234. 043	33479. 18	7663.5 4	11847. 92
Сила между шнеком и передним уплотнением	- 152.11 63		-99.19	
Сила от части шнека, превышающей диаметр шнека на выходе	0.00		0.00	
Сила на входе	321.34 57	4080.4 4	297.01	2578.6 3
Динамическая сила	25.996 6	26.53	87.82	0.7052
Сила у заднего уплотнения	11802. 48	32287. 55	9096.8 5	10922. 57
Сила в полости АОР	945.51 95	3835.5 7	465.85	2696.3 4
Сила от заднего диска	12866. 843	37283. 89	9811.8 3	14809. 78
Сила в полости за АОР	118.83	1160.7	249.12	1190.8
Внешняя сила	0.0000	432.99	0.0000	1832.2 8
Суммарная сила	432.99	130.72	1832.2	2214.8
<u>Разгрузочные отверстия</u>				
Диаметр отверстия, мм	6.0	6.0	6.0	6.0
Диаметр средней линии отверстия, мм	34.00	34.00	38.00	32.00
Количество отверстий	9	9	6	6
Диаметр вала	28.00	28.00	32.00	25.00

Таблица 3.14 - Геометрические параметры насосов

Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
	1 ступень	2 ступень	1 ступень	2 ступень
<u>Вход в шнек</u>				
Диаметр корпуса над шнеком, мм	65.0	-	69.0	-
Наружный диаметр, мм	64.0	-	68.0	-
Диаметр втулки, мм	28.0	-	32.0	-
Угол установки на среднем диаметре, град	14.36	-	16.99	-
<u>Выход из шнека</u>				
Наружный диаметр, мм	64.0	-	68.0	-
Диаметр втулки, мм	28.0	-	32.0	-
Толщина лопасти на расчетном диаметре, мм	3.00	-	3.00	-
Угол установки на среднем диаметре, град	15.66	-	18.39	-
Число лопастей	3	-	3	-
<u>Вход в крыльчатку</u>				
Периферийный диаметр, мм	50.0	50.0	62.0	42.0
Диаметр втулки, мм	28.0	28.0	32.0	25.0
Средний диаметр кромки лопасти, мм	45.0	45.0	60.0	40.0
Ширина кромки, мм	20.0	20.0	15.0	10.0
Толщина кромки, мм	1.0	1.0	1.2	1.0
Угол установки лопасти, град	30.00	30.00	16.00	16.00
Число лопастей	9	9	9	9
<u>Выход из крыльчатки</u>				
Наружный диаметр (расчетный), мм	132.0	135.6	105.7	85.1
Ширина кромки, мм	7.0	7.0	10.0	5.0
Толщина кромки, мм	1.2	1.2	1.6	1.2
Угол установки лопасти, град	40.00	40.00	20.00	20.00
Число лопастей	9	9	9	9

Продолжение таблицы 3.14				
Наименование параметра	Значение параметра			
	Насос горючего		Насос окислителя	
<u>Спиральный отвод</u>				
Количество каналов отвода	1	1	1	1
Диаметр начала отвода, мм	140.0	140.0	111.0	90.0
Ширина (высота) отвода, мм	20.00	20.00	30.00	22.00
<u>Переднее уплотнение</u>				
Диаметр, мм	55.0	55.0	65.0	48.0
Максимальный рабочий зазор (радиальный), мм	0.10	0.12	0.15	0.07
Длина, мм	7.0	7.0	7.0	7.0
Коэффициент расхода	0.5625	0.5992	0.6280	0.4733
<u>Заднее уплотнение</u>				
Диаметр, мм	60.0	60.0	52.0	52.0
Максимальный рабочий зазор (радиальный), мм	0.10	0.15	0.20	0.10
Длина, мм	7.0	7.0	7.0	7.0
Коэффициент расхода	0.5712	0.6450	0.6875	0.5712
<u>Автомат осевой разгрузки</u>				
Диаметр, мм	40.0	40.0	44.0	36.0
Осевой зазор, мм	0.10	0.10	0.20	0.20
Зазор: диск-корпус, мм	5.0	5.0	5.0	5.0
Коэффициент расхода	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000

Расчет параметров турбин ТНА. Исходные данные и результаты расчета турбин приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15

Наименование параметра	Размер	Индекс	Значение
Расход газа через турбину	кг/сек	mt	14.09
Полная температура на входе в турбину	К	T01	862.4
Полное давление на входе в турбину	Па	P01	25113600
Давление на выходе из турбины	Па	P2	13194450
Показатель адиабаты	-	k	1.30
Коэффициент сжимаемости	-	z	1.0
Газовая постоянная	Дж/(кг·К)	R	506.196
Частота вращения ротора	об/мин	n	35000
Располагаемая адиабатическая работа по параметрам узла турбины	Дж/кг	L0s	261098
Коэффициент сохранения полного давления в подводящем корпусе	-	Sug1	0.985
Полное давление перед СА I ступени	Па	P01cal	24736896
Статическое давление за рабочим колесом II ступени	Па	P2pk2	13260422
Условная скорость истечения, соответствующая располагаемой адиабатической работе по параметрам узла турбины	м/сек	c0s	722.63
Число Парсонса Y (приведенная окружная скорость (u/C_0) для турбины ТНА Г)	-	Y	0.459
Окружная скорость на среднем диаметре проточной части	м/сек	Ucp	234.57
Средний диаметр проточной части	м	Dcp	0.128
Отношение располагаемой адиабатической работы на I ступени к располагаемой работе проточной части	-	H1	0.525
Степень реактивности на среднем диаметре для I ступени	-	gosp1	0.05
Степень реактивности на среднем диаметре для II ступени	-	gosp2	0.07
Угол входа потока СА I ступени	град	alf01	90

Продолжение таблицы 3.15			
Наименование параметра	Размер	Индекс	Значение
Угол выхода потока СА I ступени	град	alf11	14.0
Угол выхода потока СА II ступени	град	alf12	14.0
Толщина выходной кромки лопаток СА I и II ступеней	мм	d1	0.5
Толщина выходной кромки лопаток РК I и II ступеней	мм	d2	0.5
Коэффициент скорости потока в СА I и II ступеней	-	fi0	0.98
Коэффициент скорости потока в каналах РК I и II ступеней (начальное значение)	-	psi0	0.97
“Горло” канала СА I ступени	мм	a11	3.30
“Горло” канала СА II ступени	мм	a12	3.30
“Горло” канала РК I ступени	мм	a21	3.0
“Горло” канала РК II ступени	мм	a22	3.0
Утечка газа после СА I ступени, не проходящая через остальные венцы	кг/с	myt1	0
Радиальный зазор между бандажом и корпусом для I ступени (на радиус)	мм	delta1	0.12
Радиальный зазор в диафрагменном уплотнении под СА II ступени	мм	deltag	0.12
Радиальный зазор между бандажом и корпусом для II ступени (на радиус)	мм	delta2	0.12
Диаметр расположения диафрагменного уплотнения	м	Dg	0.090
Коэффициент расхода через радиальный зазор над РК I ступени	-	mu1	1.0
Коэффициент расхода через радиальный зазор в диафрагменном уплотнении под СА II ступени	-	mug	1.0
Коэффициент расхода через радиальный зазор над РК II ступени	-	mu2	1.0
Удельная теплоемкость	Дж/кг* К	Cp	2193.53
Диаметр отводящего патрубка	м	Dv	0.08

Результаты расчетов

- | | |
|----------------------------|--------------------------------|
| 1) $L_{0пч}=253514.123160$ | 2) $P_{2рк2}=13260422.000000$ |
| 3) $C_{0s}=722.627942$ | 4) $L_{01}=133094.914660$ |
| 5) $C_{01}=515.935877$ | 6) $P_{21}=18032138.934000$ |
| 7) $C_1=476.513152$ | 8) $T_1=810.641822$ |
| 9) $P_1=18329698.463000$ | 10) $r_{01}=44.669142$ |
| 11) $alf_{11}=14.000000$ | 12) $l_{11}=6.804457$ |
| 13) $ksi_1=0.102114$ | 14) $f_{\bar{i}}=0.947569$ |
| 15) $C_{1u}=462.358675$ | 16) $C_{1a}=115.278962$ |
| 17) $w_{1u}=227.788675$ | 18) $w_1=255.297708$ |
| 19) $bet_{1cp}=26.842993$ | 20) $lam(c_1)=0.678326$ |
| 21) $A=1.112130$ | 22) $D_{пер}=0.136304$ |
| 23) $гопер_1=0.145783$ | 24) $C_{1пер}=451.845992$ |
| 25) $T_{1пер}=815.861748$ | 26) $P_{1пер}=18910259.433000$ |
| 27) $го_{1пер}=45.789110$ | 28) $f_1=0.000053$ |
| 29) $mpz_1=0.472127$ | 30) $mpk_1=13.617873$ |

*Здесь заканчивается расчет пар-ов потока на выходе из СА 1 ст-ни $\{f_{\bar{i}}$ и $l_1\}$ *

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 31) $w_2=256.965125$ | 32) $T_{21}=810.447123$ |
| 33) $го_{21}=43.954551$ | 34) $bet_{2cp}=21.164326$ |
| 35) $ksi_2=0.158795$ | 36) $psi_2=0.917172$ |
| 37) $l_{21}=8.304457$ | 38) $w_{2u}=239.632514$ |
| 39) $w_{2a}=92.775717$ | 40) $C_{2u}=-5.062514$ |
| 41) $C_2=92.913738$ | 42) $alf_{2доп}=-3.123374$ |
| 43) $alf_{21}=86.876626$ | 44) $Lu_1=109642.988350$ |
| 45) $КПД_{u1}=0.823795$ | 46) $Fd_1=1.538757$ |
| 47) $dКПД_{рз}=0.028234$ | 48) $D_{кор_1}=0.119696$ |
| 49) $U_{кор}=219.353539$ | 50) $N_{тр}=5.741382$ |
| 51) $dКПД_{тр}=0.003062$ | 52) $КПД_{i1}=0.792500$ |
| 53) $N_1=1486.181671$ | 54) $Li_1=105477.762290$ |

55) $T_{21полн}=814.314146$
57) $A_{ocI}=0.000000$
59) $P_{21полн}=18222190.021$

56) $A_{кр2}=682.618572$
58) $D_{нар1}=0.141304$
60) $lam(c2)=0.136114$

————— * II ступень

* —————

61) $T_{02полн}=814.314146$
63) $L_{02}=126331.243240$
65) $P_{2рк2}=13260422.0000$
67) $lam(c12)=0.674864$
69) $T_{12}=765.939420$
71) $PI(lc12t)=0.744657$
73) $ro_{12}=34.998050$
75) $ksi_{12}=0.096854$
77) $C_{12u}=446.991002$
79) $w_{12u}=212.421002$
81) $bet_{1ср2}=27.683897$
83) $D_{пер2}=0.138382$
85) $гопер2=0.185514$
87) $lam(c12пер)=0.631558$
89) $T_{12пер}=771.948726$
91) $f_2=0.000054$
93) $mpк2=13.677842$
95) $T_{22}=764.416708$
97) $bet_{2ср2}=22.174314$
99) $psi_2=0.923918$
101) $mca_2=13.460912$

62) $P_{02полн}=18222190.021000$
64) $C_{02}=502.655435$
66) $C_{12}=460.675018$
68) $tau(c12)=0.940595$
70) $D_{нар2}=0.143382$
72) $P_{12}=13569285.574000$
74) $l_{12}=8.582246$
76) $f_{i2}=0.950340$
78) $C_{12a}=111.447370$
80) $w_{12}=239.881635$
82) $l_{22}=10.382246$
84) $A_2=1.141824$
86) $C_{12пер}=431.113043$
88) $tau(c12пер)=0.947974$
90) $P_{12пер}=14091039.870000$
92) $mpз2=0.412158$
94) $w_{22}=253.423419$
96) $ro_{22}=34.269555$
98) $ksi_{22}=0.146375$
100) $mg=0.629088$
102) $lam(c12перт)=0.664560$

*Закончили определение угла $вет_{2ср}$ и psi_1 , при принятой $оср_2$ *

103) $w_{22u}=234.680194$
105) $C_{22u}=-0.110194$
107) $alf_{2доп2}=-0.066009$

104) $w_{22a}=95.648502$
106) $C_{22}=95.648566$
108) $alf_{22}=89.933991$

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 109) $Lu_2=104876.527520$ | 110) $KПДu_2=0.830171$ |
| 111) $Fd_2=1.249569$ | 112) $dKПДp_2=0.023902$ |
| 113) $Dкор_2=0.117618$ | 114) $Uкор_2=215.436519$ |
| 115) $Nтр_2=4.114968$ | 116) $dKПДтр_2=0.002312$ |
| 117) $KПДi_2=0.803957$ | 118) $N_2=1431.049178$ |
| 119) $Li_2=101564.881310$ | 120) $T_2рк_2полн=768.012121$ |
| 121) $Aкр_2=662.927672$ | 122) $AосII=0.000000$ |
| 123) $lam(c_{22})=0.144282$ | 124) $PI(lc_{22})=0.988287$ |
| 125) $P_{2рк_2п}=13417584.449000$ | |
-

* Определение суммарных параметров двухступенчатой турбины *

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 125) $N_{сум}=2756$ | 126) $KПДiпч=0.816691$ |
| 127) $KПД_{сум}=0.7503$ | 128) $T_{2вых}=766.463288$ |
| 129) $го_{2вых}=34.008010$ | 130) $C_{2вых}=82.429738$ |
| 131) $lam(c_{2вых})=0.124342$ | 132) $PI(lamc_{2в})=0.991291$ |
| 133) $P_{2в.п.}=13310376.181$ | 134) $сигма_{2вых.}=0.992010$ |
| 135) $F_{вых.}=0.005027$ | 136) $A_{сум}=0.000000$ |

3.5 Проектирование подшипников скольжения для ТНА

При проектировании опор осей и валов перед конструктором возникает прежде всего вопрос о том, что в данном случае предпочтительнее – подшипник скольжения или подшипник качения.

Подшипники скольжения могут конкурировать с подшипниками качения во многих отраслях машиностроения, а в ряде случаев предпочтение должно быть отдано именно подшипникам скольжения из за их особенностей.

Область применения опор скольжения не только не сужается, но и имеет определенную тенденцию к расширению, особенно в машинах с быстро вращающимися валами - в центрифугах, турбинах, шлифовальных станках и других, где скорость вращения измеряется десятками тысяч оборотов в минуту.

В таких условиях малейшее нарушение балансировки ротора может вызвать разрушение подшипника качения и аварию машины, тогда как подшипники скольжения оказываются устойчивыми благодаря демпфирующими свойствами смазочного слоя.

Но не только для быстровращающихся валов опоры скольжения оказываются единственно возможными. От подшипников качения приходится отказаться в ряде других случаев. Например, для турбогенераторов, работающих длительное время без остановки, подшипники качения оказываются недостаточно долговечными, тогда как опоры скольжения в условиях жидкостного трения практически не подвержены износу.

Подшипник — техническое устройство, являющееся частью опоры, которое поддерживает вал, ось или иную конструкцию, фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение или линейное перемещение (для линейных под-

шипников) с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передаёт нагрузку на другие части конструкции.

Подшипники скольжения — это опора или направляющая механизма или машины, в которой трение происходит при скольжении сопряжённых поверхностей.

Виды подшипников скольжения. Подшипники скольжения по направлению восприятия нагрузки разделяют на: радиальные, осевые (упорные);

Подшипники скольжения в зависимости от режима смазки делятся на:

- гидродинамические;
- гидростатические;
- газодинамические;
- газостатические (роль смазки выполняет воздух или нейтральный газ)
- с твёрдой смазкой.

Радиальные подшипники скольжения обычно выполняются в виде втулки, двух или более вкладышей, полностью или частично охватывающих вал. Такие подшипники скольжения работают главным образом в режиме жидкостного или полужидкостного трения. Смазка подводится через отверстия во вкладышах, кольцевые или местные винтовые канавки и карманы, находящиеся в зоне разъёма. Радиальные подшипники скольжения применяются в буксовых узлах вагонов, в опорах двигателей внутреннего сгорания, турбогенераторов и др.

Высокоскоростные подшипники скольжения жидкостного трения выполняются с жёсткими вкладышами или самоустанавливающимися в виде качающихся, свободных и кольцеобразных «плавающих» вкладышей.

Подшипники скольжения имеют следующие преимущества:

- позволяют работать в воде, при вибрационных и ударных нагрузках;
- экономичны при больших диаметрах валов;

- возможность установки на валах, где подшипник должен быть разъемным (для коленчатых валов);
- допускают регулирование различного зазора и, следовательно, точную установку геометрической оси вала.
- Отказ подшипника не приводит к катастрофическим разрушениям.

Недостатки:

- высокие потери на трение и, следовательно, пониженный коэффициент полезного действия (0,95... 0,98);
- необходимость в непрерывном смазывании;
- неравномерный износ подшипника и цапфы;
- применение для изготовления подшипников дорогостоящих материалов;
- относительно высокая трудоемкость изготовления.

Методика расчёта подшипников скольжения.

При постановке задачи подбора подшипника скольжения необходимо знать динамические и теплофизические свойства среды, которая будет обеспечивать работоспособность конструкции. Факторы внешней среды, влияющие на работоспособность подшипника скольжения ТНА представлены на рисунке 3.9.

Для описания течения вязкой сжимаемой жидкости или газа используется система уравнений в частных производных: уравнение неразрывности, уравнение количества движения (уравнения Навье-Стокса) и уравнения энергии, а также уравнения теплофизических параметров, которые замыкают систему дифференциальных уравнений (рисунок 3.10).

Приведённая схема показывает принцип совместного решения задачи динамики, теплофизики и теории упругости для расчета радиальных подшипников.

Газ можно рассматривать как вязкую сжимаемую жидкость, на которую можно распространить основные уравнения гидродинамики. Как и несжимаемые жидкости, газы так же образуют при определенных условиях смазочный слой, отде-

ляющий трущиеся поверхности друг от друга. Вязкость газов весьма мала, соответственно несущая способность газового слоя и сопротивление его вращению подшипника во много раз меньше, чем у смазочного слоя несжимаемой жидкости.

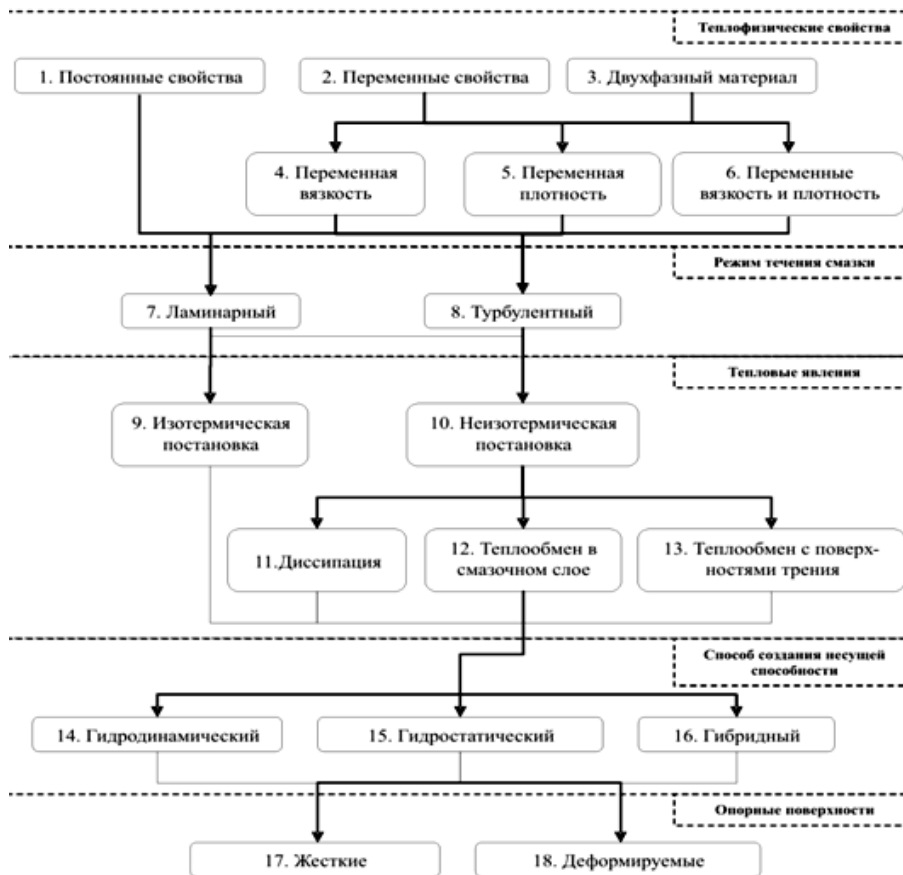


Рисунок 3.9 - Учитываемые факторы и явления

Эти особенности обуславливают область применения подшипников с газовой смазкой — в основном для опор быстровращающихся валов при небольшой удельной нагрузке.

ке; скорость вращения — порядка десятков тысяч оборотов в минуту, ρ — порядка до 1 кг/см^3 .

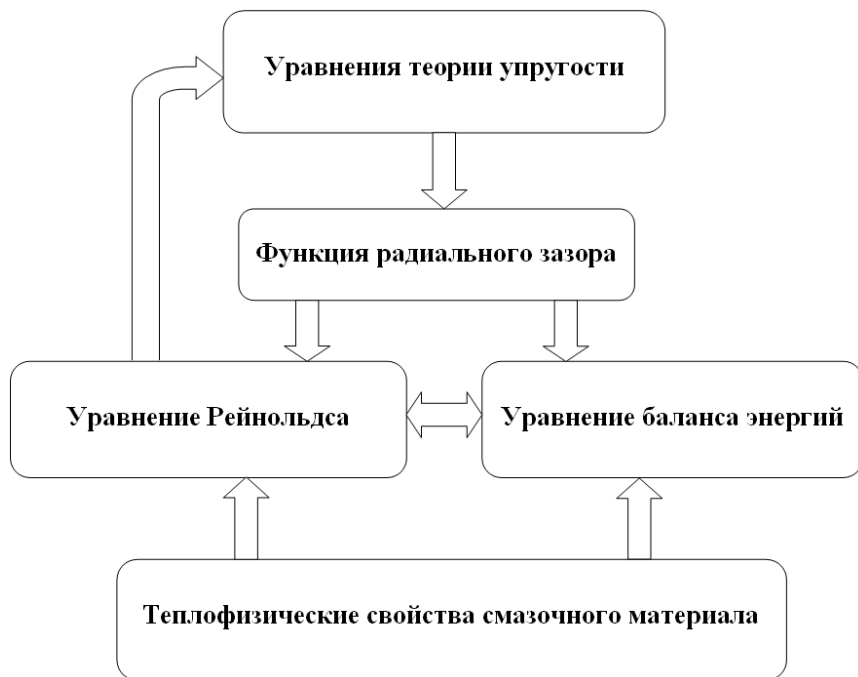


Рисунок 3.10 - Баланс энергий

При подаче газа в подшипник под давлением нагрузочная способность может быть существенно увеличена. Типичные примеры применения: опоры шлифовальных шпинделей, вертикальных роторов центрифуг и сепараторов, опоры валов центробежных насосов химической промышленности, газовых турбин, гироскопических приборов.

Газовые подшипники характеризуются весьма малым относительным зазором — не более 0,1%; поэтому требования к точности и чистоте поверхности для них значительно строже, чем для подшипников с жидкой смазкой.

Для определения несущей силы подшипника служит обобщенное уравнение Рейнольдса

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 12\rho V + 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) + 6 \frac{\partial}{\partial z} (\rho W h) + 12h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.62)$$

Решение этого уравнения в общем виде усложнено тем, что динамическая вязкость μ и плотность ρ рабочего тела зависят от давления и температуры. Для упрощения задачи принимают ряд допущений: так как температура рабочего тела смазочном слое изменяется в узких пределах, порядка 3—5° С, то изменение вязкости пренебрежимо мало, и с достаточной для практических расчетов точностью можно принять

$$\mu(t) = const \quad (3.63)$$

С тем же основанием можно принять, что плотность, при мало изменяющейся температуре

$$\rho(t) = const, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.64)$$

С другой стороны, для установившегося режима работы и ламинарного потока компоненты скорости V и W равны нулю.

Таким образом, уравнение Рейнольдса при указанных допущениях примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \rho \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \rho \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) \quad (3.65)$$

Зависимость плотности ρ от давления в общем для политропического процесса выражается уравнением

$$\frac{P}{\rho^n} = const$$

где показатель политропы n в пределах $1 < n < 1,4$

Так как изменение температуры незначительно, то принимают $n=1$, т. е. считают процесс изотермическим; тогда

$$\frac{P}{\rho} = const \quad (3.66)$$

и в уравнении (66) можно заменить ρ пропорциональной величиной P

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 P \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{\partial}{\partial x} (Ph) \quad (3.67)$$

Это уравнение служит для определения несущей силы смазочного слоя цилиндрического подшипника конечной длины. Решение его приближенным методом было дано С. А. Шейнбергом.

Пусть при некоторых условиях цапфа занимает в подшипнике положение, показанное на рисунке 3.11. Для исследования уравнения (67) удобнее перейти к цилиндрическим координатам, для чего служат выражения

$$x = r\varphi, \quad h = \delta(1 + \chi \cos \varphi); \quad U = \omega r \quad (3.68)$$

С введением безразмерных параметров

$$\bar{P} = \frac{P}{P_a} \quad (3.69)$$

где P_a - давление на входе в подшипник,

$$\zeta = \frac{z}{b}; \quad \eta = \frac{6\mu\omega r^2}{e^2 P_a} \quad (3.70)$$

где e — эксцентриситет в подшипнике.

Уравнение (67) принимает вид

$$\left(\frac{l}{d}\right)^2 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\bar{P} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} \left(\frac{1 + \chi \cos \varphi}{\chi} \right)^3 + \eta \bar{P} \frac{1 + \chi \cos \varphi}{\chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\bar{P} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \zeta} \left(\frac{1 + \chi \cos \varphi}{\chi} \right)^3 \right] = 0 \quad (3.71)$$

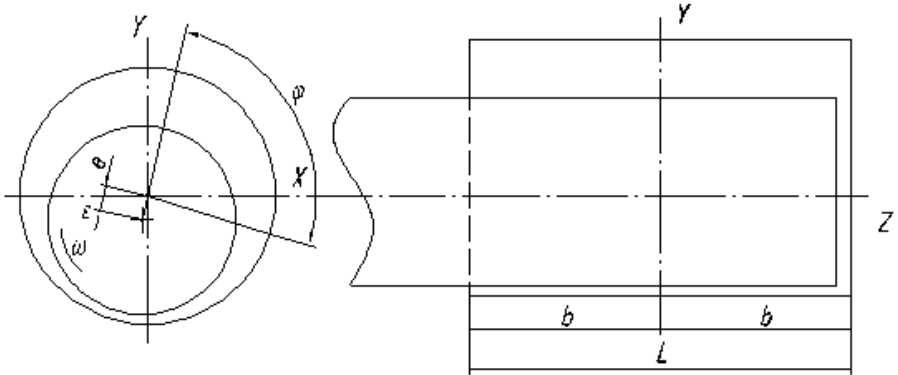


Рисунок 3.11 - Положение цапфы в подшипнике

Уравнение (71) содержит три независимых параметра:

- относительный эксцентриситет

$$\chi = \frac{e}{\delta};$$

- отношение $\left(\frac{l}{d}\right)$, с которым связана интенсивность истечения смазки из торцов;

- безразмерный коэффициент

$$\eta = \frac{6\mu\omega r^2}{e^2 P_a}$$

Для решения уравнения (3.71) использована зависимость давления P в произвольном сечении смазочного слоя подшипника конечной длины от давления P_∞ в подшипнике без торцового истечения и от P_a . Эта зависимость была дана проф. Е. М. Гутьяром.

$$P = (P_\infty - P_a) \left[1 - \frac{ch \frac{z}{cr}}{\frac{b}{cr}} \right] \quad (3.72)$$

Несущая сила смазочного слоя определяется из выражения

$$\begin{aligned} F &= \int_{-b}^{+b} \int_0^{2\pi} P \cdot r \cos[180 - (\varphi + \varphi_a)] d\varphi dz \\ &= 2b \left(1 - \frac{cr}{b} \operatorname{th} \frac{b}{cr} \right) \int_0^{2\pi} P \cdot r \cos[180 - (\varphi + \varphi_a)] d\varphi \end{aligned} \quad (3.73)$$

С введением безразмерных величин: коэффициента нагруженности

$$K_n = \frac{1}{P_a} \int_0^{2\pi} P \cos[180 - (\varphi + \varphi_a)] d\varphi \quad (3.74)$$

и коэффициента заполнения

$$K_3 = 1 - \frac{cr}{b} \operatorname{tg} \frac{b}{cr} \quad (3.75)$$

уравнение (75) принимает вид

$$P = 2brP_a K_n K_a = 0.5P_a l d K_n K_3 \quad (3.76)$$

Численные значения K_n и c были определены С. А. Шейнбергом в зависимости от безразмерной характеристики η_b при χ , равном 0,33; 0,50; 0,625 и 0,715; соответствующие кривые представлены на рисунке 3.12.

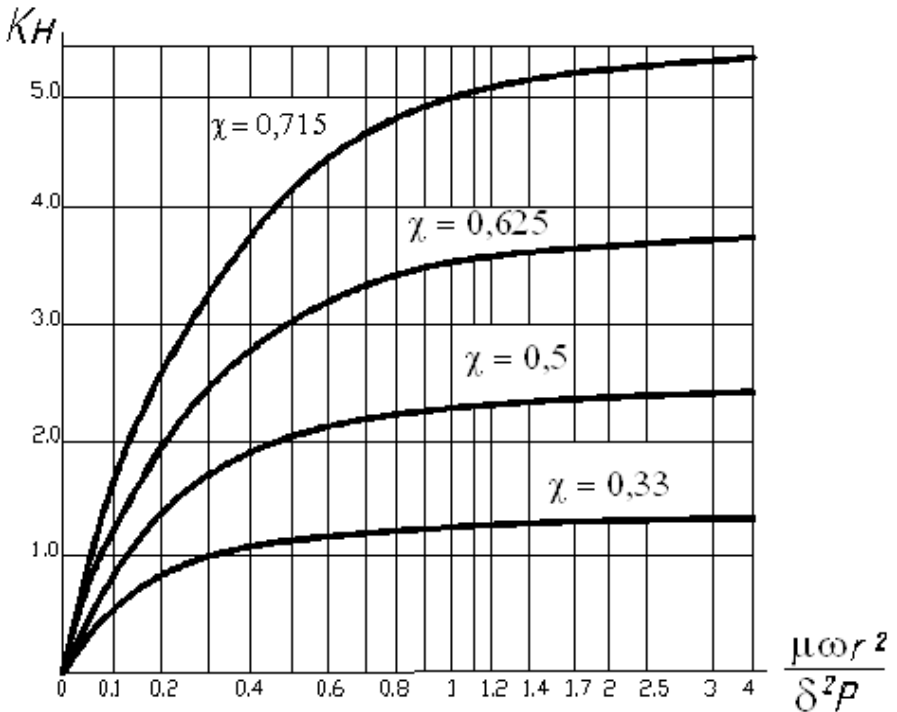


Рисунок 3.12 - Зависимость коэффициента K_H от безразмерной величины $\frac{\mu\omega r^2}{\delta^2 p}$

Момент сопротивления смазочного слоя вращению определяется из выражения

$$M_T = \frac{4\pi r^3 \mu \omega b}{\delta} \cdot \frac{1 \pm K_T K_3}{\sqrt{1 - \chi^2}} \quad (3.77)$$

Здесь знак плюс относится к моменту на валу, знак минус — к моменту на подшипнике.

График безразмерного коэффициента K_T в зависимости от безразмерной характеристики $\eta_\delta = \frac{\mu\omega r^2}{\delta^2 p}$ представлен на рисунке 3.13 для четырех значений относительного эксцентриситета χ .

Так как обычно произведение $K_T K_3 \ll 1$ то для приближенных расчетов можно пользоваться упрощенной зависимостью

$$M_T = \frac{4\pi r^3 \mu \omega b}{\delta \sqrt{1 - \chi^2}} \quad (3.78)$$

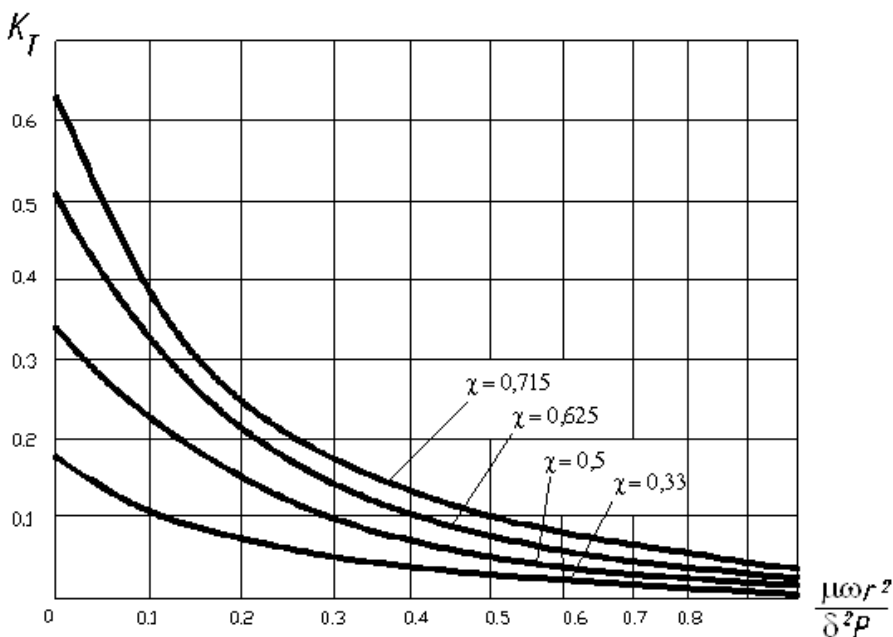


Рисунок 3.13 - Зависимость коэффициента K_T от безразмерной величины $\frac{\mu\omega r^2}{\delta^2 p}$

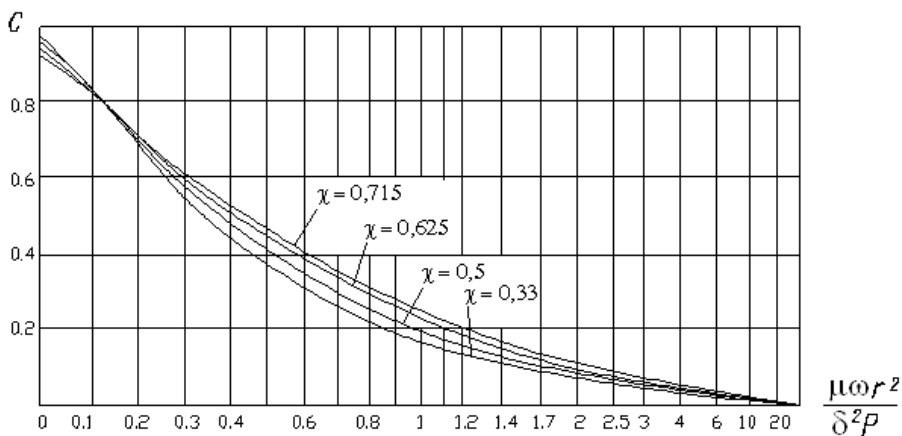


Рисунок 3.14 - Зависимость коэффициента C от безразмерной величины $\frac{\mu\omega r^2}{\delta^2\rho}$

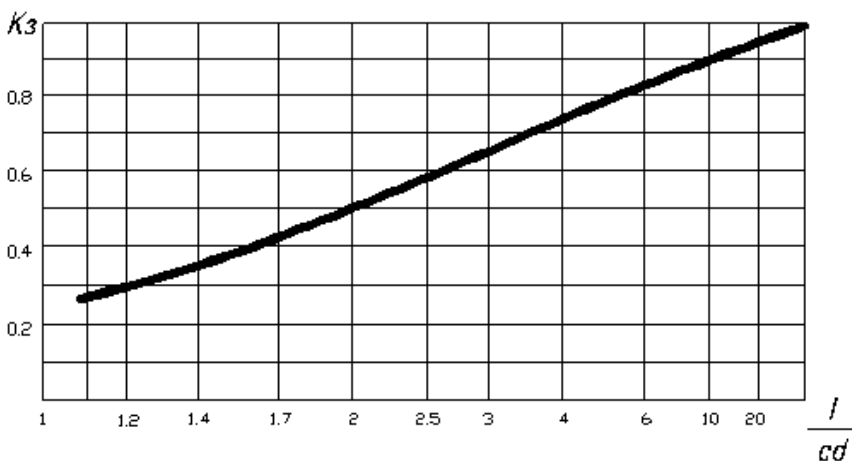


Рисунок 3.15 - Зависимость коэффициента K_z от безразмерной величины $(l/c\delta)$

При значениях $\chi < 0.3$ характерных для подшипников быстро вращающихся легко нагруженных валов, можно принять

$$M_T = \frac{4\pi r^3 \mu \omega b}{\delta}$$

Соответствующая затрата энергии на каждый подшипник

$$N_T = M_T \omega \quad (3.79)$$

При расчете подшипника основные параметры (диаметр d , длина l) определяются конструктивно; скорость вращения ω и нагрузка F должны быть известны из технического задания: зазор между втулкой и подшипником

$$s = 2\delta,$$

где δ - радиальный зазор.

Зазор выбирается в зависимости от диаметра

$$d, \text{ мм} \quad 15-25 \quad 25-40 \quad 40-40$$

$$s, \text{ мк} \quad 15-25 \quad 25-30 \quad 25-40$$

Далее вычисляется безразмерный коэффициент

$$\eta_\delta = \frac{\mu \omega r^2}{\delta^2 P_a},$$

не зависящий от χ . По рисунку 3.12 определяют четыре значения коэффициента нагруженности K_H , соответственно, при $\chi = 0.33$, $\chi = 0.50$, $\chi = 0.625$, $\chi = 0.715$.

Аналогично по рисунку 3.14 находят четыре значения коэффициента c и вычисляют отношение l/d , по которому находят из рисунка 3.15 четыре значения коэффициента K_3 . Вычислив произведение $K_H K_3$ для четырех значений χ строят

соответствующую кривую. Определив значение K_{HK_3} для заданной нагрузки F из выражения (76), находят расчетное значение χ из построенного графика; наименьшая толщина смазочного слоя h_{min} , определяемая по формуле

$$h_{min} = \delta(1 - \chi) \quad (3.80)$$

должна быть больше $h_{кр}$. При шероховатости поверхностей, соответствующей классу чистоты $\nabla 11$ — $\nabla 12$, допустимое значение $h_{кр} \geq 3$ мкм.

Безразмерный коэффициент K_T характеризующий сопротивление вращению, определяют из рисунка 3.13 в зависимости от вычисленного ранее значения η_6 и по найденной величине относительного эксцентриситета. Момент трения M_T определится по выражению (3.78).

3.6 Безопасность и экология

3.6.1 Анализ потенциально опасных и вредных факторов

Охрана труда - это система социально-экономических, организационно-технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, а также соответствующих законодательных актов, обеспечивающая сохранение здоровья и работоспособности человека во время работы.

Под условиями труда понимается совокупность факторов производственной среды, оказывающих влияние на здоровье и трудоспособность человека в процессе труда. Условия труда - это сложное объективное явление, формирующееся в процессе труда под воздействием взаимосвязанных факторов социально - экономического, технико-организационного и естественно -природного характера и влияющее на здоровье, работоспособность человека, его отношение к труду, степень удовлетворённости трудом, эффективность и другие экономи-

ческие результаты производства, на уровень жизни и всестороннее развитие человека, как главной производительной силы общества.

Научно-исследовательский институт труда разработал классификацию факторов, воздействующих на формирование условий труда, согласно которой условия труда подразделяются на четыре группы.

Первая группа - санитарно-гигиенические элементы (микроклимат, освещённость, механические колебания и т.д.). Эти элементы оцениваются количественно и нормируются. Их отрицательное влияние может корректироваться при помощи различных мер защиты.

Вторая группа - психофизиологические элементы (физическая нагрузка, нервно-психическое напряжение, рабочая поза и т.д.). Элементы данной группы, как правило, не нормируются, кроме динамической работы, являющейся составной частью физической нагрузки. Для них нет стандартных общепринятых единиц измерения.

Третья группа - эстетические элементы, раскрывающие то, какие элементы процесса производства и труда могут вызывать эстетическое отношение, и в каких единицах оно может измеряться. Есть примеры определения эстетического уровня отдельных элементов условий труда методами экспертной оценки.

Четвёртая группа - социально-психологические элементы, составляющие характеристики психологического климата, а также некоторые социальные характеристики трудового процесса. Эта группа порождается социально - экономическими отношениями в обществе, в том числе отношением к труду. Элементы этой группы пока также не имеют единиц измерения, на них нет норм и стандартов.

Стандарт на эргономические требования использует термин "обитаемость", под которым понимается совокупность физических, химических, биологических и эстетических факторов внешней среды на рабочем месте, влияющих на функ-

циональное состояние человека, его работоспособность и здоровье.

Комфортным называется состояние внешней среды на рабочем месте, обеспечивающее оптимальную динамику работоспособности, хорошее самочувствие и здоровье работающего человека.

Дискомфортным называют то состояние внешней среды на рабочем месте, которое обеспечивает заданную работоспособность и сохранение здоровья, но вызывает у человека неприятные субъективные ощущения и функциональные изменения, не выходящие за пределы нормы.

Экстремальным называют то состояние внешней среды на рабочем месте, которое приводит к снижению работоспособности человека и вызывает функциональные изменения, выходящие за пределы нормы, но не ведущие к патологическим изменениям.

Сверхэкстремальным называют состояние внешней среды на рабочем месте, которое приводит к возникновению в организме человека патологических изменений (или невозможности выполнения человеком работы).

Для большинства людей комфортными являются условия при температуре окружающей среды примерно на уровне 18...20°C выше нуля, влажности в пределах 30...60% и скорости движения воздуха не более 0,2м/с. Однако температура воздуха у поверхности пола и на уровне головы не должна отличаться более чем на 5°. Если температура воздуха в помещении в течение длительного времени превышает 29°C, то становится необходимо кондиционирование воздуха.

Факторами, ухудшающими внешнюю среду на производстве, могут быть:

- 1) Выделение тепла (конвективного и лучевого);
- 2) Выделение влаги (водяных паров);
- 3) Выделение газов и паров химических веществ обшетоксичного и раздражающего действия;
- 4) Выделение токсичной и нетоксичной пыли;

- 5) Выделение радиоактивных веществ;
- 6) Различные комбинации указанных выделений.

Рациональное освещение производственных помещений - один из тех факторов, от которых зависит эффективность трудовой деятельности человека. Освещение должно отвечать ряду общих требований. Важно правильно выбрать источник света и систему освещения, предусмотреть меры защиты от слепящего света и устранение бликов. Освещённость должна соответствовать характеру выполнения работы.

Значительное влияние на условия труда оказывает производственный шум, который вызывает профессиональное поражение органов слуха. Предельно допустимые уровни звукового давления и уровней звука устанавливаются "Гигиеническими нормами", которые соответствуют рекомендациям "Международной организации по акустике".

3.6.2 Меры защиты от опасных и вредных факторов

Наряду со всеми мерами, принимаемыми для безопасности человека, огромное внимание уделяется средствам защиты, которые оговорены в ГОСТ 12.4011-89. Средства защиты, в зависимости от характера их применения, подразделяются на две категории:

- средства коллективной защиты;
- средства индивидуальной защиты (СИЗ).
- средства коллективной защиты подразделяют, в зависимости от назначения, на следующие классы:
 - средства нормализации воздушной среды в производственных помещениях и на рабочих местах;
 - средства нормализации освещения производственных помещений и рабочих мест;
 - средства защиты от инфракрасных, электромагнитных и лазерных излучений;
 - средства защиты от пониженных или повышенных температур;

- средства защиты от поражения электрическим током;
- средства защиты от воздействия механических факторов;
- средства защиты от воздействия химических факторов;
- средства защиты от воздействия биологических факторов;
- средства защиты от гравитационных факторов.

СИЗ в зависимости от назначения подразделяются на следующие типы:

- костюмы изолированные;
- средства защиты органов дыхания;
- средства защиты ног;
- средства защиты рук;
- средства защиты головы, лица, глаз, органов слуха;
- комплексные средства защиты.

СИЗ следует применять тогда, когда безопасность работ не может быть обеспечена конструкцией оборудования, организацией производственных процессов и средствами производственной защиты. СИЗ должны иметь инструкцию с указанием назначения и срока службы изделия, правил его эксплуатации и хранения.

Основными опасными факторами, которые могут привести к несчастным случаям на территории предприятия, в частности, при работе с криогенными и токсичными компонентами, в нашем случае, являются :

- движущиеся машины и механизмы, и их незащищённые подвижные элементы;
- низкая температура жидкого кислорода, которая может привести к низкотемпературным ожогам;
- вредное воздействие больших концентраций газообразного кислорода и паров керосина в атмосфере отсеков;
- опасность возникновения взрывоопасных смесей;
- опасность накопления статического электричества при перекачках в трубопроводах.

При работе у кислородных баков, цистерн, стационарных и транспортных ёмкостей и аппаратов должны быть применены меры, исключаяющие возможность насыщения одежды рабочих кислородом. Рабочие в одежде, загрязнённой маслом или мазутом к работе с жидким кислородом не допускаются. После работы с жидким кислородом в течение 30 минут нельзя курить, подходить к другому открытому огню.

Следует учитывать возможность возникновения взрыва при прохождении электрических токов, так как жидкий кислород обладает магнитными свойствами.

Не рекомендуется работать в одежде из нейлона, а также в резиновой и с подошвой из синтетических материалов обуви, поскольку в противном случае может накапливаться статическое электричество.

С целью обеспечения более комфортных условий работы необходимо соблюдать общие требования вибрационной безопасности (ГОСТ 12.1012-90) и общие требования безопасности по шуму (ГОСТ 12.1003-85):

- при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных зданий и сооружений, а также при организации рабочего места следует принимать меры по снижению шума, воздействующего на человека при работе, до значений, не превышающих допустимые пределы;

- внедрять бесшумную технику;

- применять средства индивидуальной и коллективной защиты;

- внедрять технические, технологические и организационные решения и мероприятия по созданию машин и оборудования с низкой вибрационной нагрузкой.

Рассматривая наш вид топлива - жидкий кислород и СПГ, можно сказать, что опасность для человека представляет нарушение требований пожарной безопасности и взрывобезопасности, несоблюдение которых может привести не только к материальным потерям, но и к гибели людей.

Во избежание несчастных случаев необходимо выполнять требования к системе противопожарной защиты согласно ГО-СТу 12.1004-85, которые гласят, что противопожарная защита должна обеспечиваться:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- применением строительных конструкций и объектов с регламентированными уровнями по огнестойкости и распространению огня;
- применением пропитанных антипиренами конструктивных материалов;
- устройствами, ограничивающими распространение огня;
- организацией своевременного оповещения и эвакуации людей из опасной зоны.

Огнестойкость зданий и сооружений должна быть такой, чтобы строительные конструкции сохраняли свои несущие и ограждающие функции при пожаре в течение необходимого для обеспечения безопасности людей и тушения пожара времени.

При обращении с жидким кислородом следует помнить, что его смеси с небольшим количеством горючего способны взрываться даже при небольшом сжатии, Так же опасны смеси кислорода со смазочными материалами (масло, мазут), поэтому все ёмкости, а также агрегаты и арматура двигателя должны быть тщательно обезжирены этиловым спиртом. В агрегатах, имеющих трущиеся пары, необходимо предотвращать искрение. Вследствие большой разницы температур жидкого кислорода и окружающей среды, а также малой теплоты испарения кислорода, происходит интенсивное парообразование кислорода. Газообразный кислород может насыщать одежду и делать её легковоспламеняющейся.

При нормальных условиях природный газ гораздо легче воздуха, поэтому при утечках он поднимается вверх, не скап-

ливаясь в углублениях, однако пары сжиженного газа тяжелее воздуха. Об относительной безопасности метана (природный газ) свидетельствует, в частности, низкая вероятность взрывов, связанных с использованием природного газа в быту.

Но тем не менее не стоит забывать, что при концентрации метана в воздухе больше 10% возможно удушье, при сжигании природного газа так же выделяется угарный газ.

Для предотвращения возникновения взрывоопасных и пожароопасных смесей на основе кислорода и СПГ, других активных веществ, необходимо выполнять санитарно-гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне (ГОСТ 12.1005-88), а также требования к производственным помещениям (ГОСТ 12.4021-85), в которых указываются требования к вентиляции:

- помещения и воздухопроводы от местных отсосов и общедоменной вентиляции должны быть очищены по установленному графику, утверждённому в соответствии с принятой на предприятии формой утверждения внутренней документации;

- для снятия статического электричества пылеприёмники и воздухопроводы вентиляционных установок должны иметь заземление;

- для исключения опасности завихрения и образования взрывоопасной смеси не допускается применять для очистки сухие центробежные циклоны и суконные фильтры.

При работе с СПГ в закрытом помещении необходима отличная вентиляция, так как смесь паров СПГ с воздухом или кислородом способна взрываться в широком диапазоне соотношений от теплового или электрического воздействия.

При концентрациях паров СПГ (10%) может наступить отравление. Пострадавшего необходимо доставить в хорошо проветриваемое помещение или на улицу, т.е. на свежий воздух. В случае потери сознания и прекращении дыхания, необходимо делать искусственное дыхание и вызвать скорую медицинскую помощь.

Жидкий кислород и его пара не токсична. Вредное воздействие на организм человека сводится к воздействию низких температур при контакте с жидкостью или вдыхании жидкого газа. При высоких концентрациях в атмосфере помещения возможно кислородное опьянение.

В заключение можно сказать, что соблюдение системы стандартов безопасности труда сведёт до минимума количество несчастных случаев, а также сохранит большое количество относящихся к производству материальных ценностей.

3.6.3 Расчет искусственного освещения

Произведем расчет искусственного освещения для конструкторского бюро. Расчет освещения по методу коэффициента использования светового потока.

Освещаемый объем помещения ограничивается ограждающими поверхностями, отражающими значительную часть светового потока, попадающего на них от источников света. В установках внутреннего освещения отражающими поверхностями являются пол, стены, потолок и оборудование, установленное в помещении. В тех случаях, когда поверхности, ограничивающие пространство, имеют высокие значения коэффициентов отражения, отраженная составляющая освещенности может иметь также большое значение и ее учет необходим, поскольку отраженные потоки могут быть сравнимы с прямыми и их недооценка может привести к значительным погрешностям в расчетах.

Под коэффициентом использования светового потока (или осветительной установки K_{oy}) принято понимать отношение светового потока, падающего на расчетную плоскость, к световому потоку источников света

Коэффициент использования ОУ, характеризующий эффективность использования светового потока источников света, определяется, с одной стороны, светораспределением и

размещением светильников, а с другой – соотношением размеров освещаемого помещения и отражающими свойствами его поверхностей.

Потребный поток источников света (ламп) в каждом светильнике Φ , для создания нормированной освещенности, находится по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot z}{K_{oy} \cdot N}, \quad (3.81)$$

где E – заданная минимальная освещенность, лк;

K_3 – коэффициент запаса;

S – освещаемая площадь (площадь расчетной поверхности), м²;

z – отношение $E_{cp}/E_{мин}$;

N – число светильников;

K_{oy} – коэффициент использования в долях единицы.

Минимальная освещенность для конструкторского бюро составляет 400 лк.

Коэффициент запаса для производственных помещений с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне не более 1 – 1,4 мг/м³.

Коэффициент z , характеризующий неравномерность освещения, можно принять равным 1,10 для люминесцентных ламп при расположении светильников в виде светящихся линий.

Для определения коэффициента использования K_{oy} находится индекс помещения i и предположительно оцениваются коэффициенты отражения поверхностей помещения.

Индекс помещения рассчитывается по формуле

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (3.82)$$

где A и B – длина и ширина помещения;

h – высота подвеса светильников.

Подставив значения в формулу 3.82 получим

$$i = 6 \cdot 18 / 3 \cdot (6 + 18) = 1,5$$

В помещении габаритами 6×18 м, с индексом $i = 1,5$ установлены четыре продольных ряда светильников ЛСП02 (КСС типа Д-2) с лампами ЛБ и требуется обеспечить $E = 400$ лк при $K = 1,4$. Задано $r_n = 70 \%$, $r_c = 50 \%$, $r_p = 30 \%$ и $z = 1,10$. В табличных данных этим условиям соответствует $K_{oy} = 0,54$.

$$\Phi = 400 \cdot 1,4 \cdot 6 \cdot 8 / 4 \cdot 0,54 = 12444 \text{ лм.}$$

Световой поток ламп одного ряда светильников. По рассчитанному значению светового потока Φ и напряжению сети выбирается ближайшая стандартная лампа, поток которой не должен отличаться от Φ больше чем на $-10 - +20\%$. При невозможности выбора с таким приближением корректируется N .

При выбранном типе светильника и спектральном типе ламп поток ламп в каждом светильнике Φ_1 может иметь различные значения. Число светильников в ряду N определяется по формуле

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_1}, \quad (83)$$

где Φ_1 – поток ламп в каждом светильнике.

При использовании светильников с лампами 2×40 Вт (с общим световым потоком 6300 лм), то в ряду необходимо установить $12444 : 6300 = 2$ светильника.

3.6.4 Охрана окружающей среды

Человечество живет внутри окружающего его мира как единовластный господин. Делает то, что хочет, но при этом совершенно не заботится о последствиях. И совершенно не важно из каких соображений это происходит: жажды наживы или еще каких-то возможно даже бескорыстных целей, результат как правило один, и расплачиваются за него потомки.

Человек со времен своего появления на планете всеми силами стремится подчинить ее себе, не жить с ней в мире и направлять все силы на совершенствование в себя, а изменяет ее для своих собственных сиюминутных нужд и интересов.

Мы живем в эпоху идущей полным ходом научно технической революции (НТР). Вокруг человека огромное количество техники призванной помочь ему, но при этом появляется несчетное число озоновых дыр, кислотные дожди, появилось огромное число природных, мутировавших под влиянием человеческой деятельности так и искусственно выведенных (для использования людьми друг против друга) вирусов.

Проблема защиты окружающей среды одна из важнейших задач современного общества. Выбросы промышленных предприятий, энергетических систем и транспорта в атмосферу, водоёмы и недра достигли таких размахов, что уровни загрязнённости существенно превышают допустимые санитарные нормы.

Вопросами развития окружающей среды занимается экологии - наука, изучающая условия существования живых существ и взаимоотношения их со средой обитания. Основным предметом экологии является воздействие человека на природу.

В целом производственные процессы должны быть рассмотрены под углом зрения экологического фактора. Назрела необходимость создания таких систем, которые не разрушали бы природное равновесие, а гармонически вписывались в естественные процессы биосферы, усиливая её свойства в нужном направлении.

Современное машиностроение развивается на базе крупных производственных объединений, включающих заготовительные, кузнечнопрессовые цехи, литейные, цехи покрытий. В состав предприятий входят также испытательные станции, ТЭЦ и вспомогательные подразделения. В процессе производства машин и оборудования широко используются сварочные

работы, механическая обработка металлов, переработка неметаллических материалов, лакокрасочные операции.

Промышленными газообразными отходами (ПГО) называются технологические газовые выбросы и выбросы вентиляционных систем, подлежащие очистке от токсичных продуктов. Самый перспективный путь - это разработка безотходного технологического процесса.

По очистке и обезвреживанию ПГО можно подразделить на два класса:

1) ПГОТ - содержащие токсичные компоненты в виде взвешенных частиц пыли и тумана;

2) ПГОГ - содержание токсичных компонентов в виде паровобразных.

Наиболее распространённым методом очистки от выбросов от газов или паров (ПГО) являются абсорбционный, адсорбционный, электрический, конденсационный и сжигание.

Абсорбционный метод основан на поглощении жидкими реагентами токсичных газов и паров из их смесей с воздухом.

Конденсационный метод основан на выделении паров из воздуха в специальных аппаратах (конденсаторах). Применяется редко, так как требует значительного расхода энергии.

Метод сжигания органических примесей применяется в тех случаях, когда возвращение примесей в производство невозможно или нецелесообразно. Термическое сжигание применяется при высокой концентрации примесей и значительном содержании в газах кислорода при температуре 800-1000 °С.

Каталитическая очистка (сжигание) в 2-3 раза дешевле высокотемпературного сжигания и применяется значительно чаще.

Соблюдение ПКД вредных веществ в воздухе населённых мест требует систематического контроля за фактическим содержанием их в атмосфере. Ухудшение экологической ситуации даёт сейчас укорочение жизни, высокую детскую смертность и т.п. В городе Воронеже экологическая ситуация по

ряду показателей очень неблагоприятна, особенно по цинку, свинцу, молибдену - более 3,5 ПДК. У Воронежского механического завода суммарная концентрация свинца, цинка, меди, кобальта, селена, вольфрама, стронция составляет 256 мг/кг, что превышает ПДК более чем в 15 раз. Такой контроль позволяет оценивать эффективность работы пылеочистительного оборудования, предусматривать необходимую степень очистки и совершенствовать технологию производства для снижения концентрации вредных веществ в отходящих газах. Для недопущения выборов в окружающую среду на вентиляционных системах необходима установка фильтров, которые должны регулярно чиститься, а вредные выбросы утилизируются.

3.7. Организационно - экономическая часть

3.7.1 Определение экономического эффекта

При создании новых машин, приборов, аппаратов, прежде всего, необходимо установить, насколько новая техника опережает существующие аналоги и является существенным скачком вперед с технической и экономической точки зрения. Технический уровень машин определяется соответствием технико-экономических показателей нового образца техники лучшим отечественным и зарубежным образцам подобных изделий и тем параметрам, которые ожидаются к тому времени, когда промышленность начнет серийный или массовый выпуск этих машин.

Несмотря на значительное число нормативных документов по оценке качества и технического уровня продукции, возникает множество методологических вопросов технического уровня изделий новой техники. В научно-технической и экономической литературе до последнего времени предлагается множество подходов к решению задач оценки технического уровня машин, приборов, аппаратов.

«Технический уровень продукции» – относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с соответствующими базовыми значениями.

В некоторых литературных источниках технический уровень определяется как относительная оценка проектируемой техники на до производственной стадии. При этом указывается, что уровень качества продукции складывается из технического уровня на стадии проектирования, уровня качества изготовления на стадии производства и уровня эксплуатационного качества на стадии потребления.

В других литературных источниках подчеркивается, что технический уровень является характеристикой качества и технического совершенства объектов техники и технологии и,

следовательно, отражает не только способность удовлетворять общественные потребности, но и прогрессивность принятых при их создании технических решений.

Кроме того, проблема оценки технического уровня объекта разработки возникает при отборе технических решений (изобретений) для использования, когда необходимо оценить, в какой мере применение того или иного технического решения (созданного в процессе разработки или заимствованного) может повлиять на технический уровень объекта.

В условиях рыночных отношений оценка технического уровня является составной частью маркетинговых исследований, так как цены на продукцию находятся в прямой зависимости от ее технического уровня. Обязательным условием ценообразования является сравнение технико-экономических показателей (ТЭП) данной продукции с лучшими отечественными и зарубежными образцами данного вида продукции.

Традиционные методы включают две группы методов: дифференцированные и комплексные. Деление на дифференцированные и комплексные методы оценки технического уровня носят условный характер.

Экономический эффект – это показатель результата какого-либо действия или деятельности (полезный труд), который может быть выражен в стоимостной оценке. Он может быть положительным (прибыль) и отрицательным (убыток).

Эффективность – это характеристика процессов и действий сугубо управленческого характера, отражающая, прежде всего степень достижения преследуемых целей, поэтому она обладает лишь целенаправленным воздействием (может быть только положительной величиной).

Решение о целесообразности создания, производства и использования новой техники принимается на основе экономического эффекта, получаемого потребителем за весь срок эксплуатации и технического обслуживания новой техники. Величина экономического эффекта должна быть положительной.

Определение экономического эффекта основывается на сопоставлении текущих (эксплуатационных) затрат за период использования и единовременных (капитальных) затрат на приобретение базового и нового двигателя.

Годовые эксплуатационные издержки на базовый и новый двигатель включают:

1. Затраты на топливо (таблица 3.16).
2. Расходы на техническое обслуживание, на приспособления и инструмент целевого назначения.
3. Зарботную плату производственного и обслуживающего персонала с начислениями.
4. Прочие виды затрат, связанные с эксплуатацией двигателя.

Стоимость топлива для ЖРД, может быть определена исходя из расхода, времени расхода и стоимости одного килограмма топлива по формуле:

$$Z_{\text{топл}} = T_{\text{РАБ}} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i ,$$

где $T_{\text{раб}}$ – время работы при наземных испытаниях,

m_i – норма расхода i – го компонента топлива в единицу времени,

C_i – цена компонента топлива за 1 кг.

Таблица 3.16 – Расчет стоимости топлива, р.

Время, расход, стоимость	Проектируемый двигатель	Базовый двигатель
Время работы двигателя, с	3200	3000
Расход горючего, кг/с	12,453	18,94
Расход окислителя, кг/с	42,341	43,56
Цена горючего, р/кг	26,6	42
Цена окислителя, р/кг	16,4	16,4
Затраты на топливо, р	3282055,04	4529592

Затраты на ремонт и техническое обслуживание двигателя в течение года определяются исходя из установленных на предприятии, где производится эксплуатация двигателя, норм и нормативов затрат для соответствующего типа изделия и составляют:

$$\begin{aligned} Z_{\text{рем. пр}} &= 56037,1 \text{ р.} \\ Z_{\text{рем. баз}} &= 59610,3 \text{ р.} \end{aligned}$$

Затраты на заработную плату обслуживающего персонала с учетом доплат и отчислений на социальные нужды определяются исходя из состава и количества рабочих, их окладов и разрядов, а также времени, затрачиваемого каждым работником в течение года, по формуле

$$Z_{\text{обсл}} = \sum_{i=1}^n T_i \cdot C_{\text{ч}} \cdot k_{\text{прем}} \cdot k_{\text{доп}} \cdot k_{\text{отч}}$$

где $T_i = 1000$ ч. – время обслуживания i -м работником одного ЖРД в течение года;

$C_{\text{ч}} = 45$ р/ч – среднечасовая тарифная ставка работников;

$n = 24$ – количество работников, участвующих в обслуживании ЖРД;

k – коэффициенты, учитывающие премию, доплаты, отчисления на социальные нужды,

$k_{\text{прем}} = 1,3$; $k_{\text{доп}} = 1,2$; $k_{\text{отч}} = 1,342$.

$Z_{\text{обсл}} = 2261001$ р.

Административно – управленческие расходы составляют 78% от основной заработной платы персонала, участвующего в обслуживании двигателя в течение года. Результаты расчета эксплуатационных издержек в течение года по сравниваемым двигателям сведены в таблицу 3.17.

Для расчета цены стендового образца ЖРД составляется калькуляция себестоимости и цены в таблице 3. 18.

Для облегчения расчета себестоимости стендового образца ЖРД приводится калькуляция себестоимости отдельного агрегата двигателя – ТНА.

Таблица 3.17 - Годовые эксплуатационные издержки на 1 двигатель по базовому и проектируемому вариантам, р.

Наименование статей затрат	Проектируемый	Базовый
1 Стоимость топлива	3282055,04	4529592
2 Расходы на ремонт и техническое обслуживание	56037,1	59610,3
3 Затраты на оплату труда обслуживающего персонала	2261001	1933308
4. Затраты на содержание зданий	2374051,7	2029973,4
4 Административно-управленческие расходы	1763581,2	1507980,2
Итого:	9736726,03	10060463,9

Таблица 3.18 - Калькуляция себестоимости стендового образца ТНА, р.

Статьи расходов	Проектируемый ТНА	Базовый ТНА	Примечание
1	2	3	4
1 Сырье и основные материалы с учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР)	71426,1	75477,5	См. таблицу 3.17 + ТЗР (10% от стоимости материалов)
2 Покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты	10200	8484	См. таблицу 3.17
3 Возвратные отходы (вычитаются)	504,2	0	См. таблицу 3.17
4 Основная заработная плата производственных рабочих (с премией)	140224,5	123165,5	См. таблицу 3.18

Продолжение таблицы 3.18			
1	2	3	4
5 Дополнительная заработная плата	28044,9	24633,1	20 % от п. 4
6 Отчисления на социальные нужды	57548,1	42122,6	34,2 % от (п. 4 + п.5)
7 Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО)	179487,36	157651,8	128 % от п. 4
8 Цеховые расходы	175280,62	153956,87	125 % от п. 4
9 Общехозяйственные расходы (ОХР)	477885,09	419748,02	340,8 % от п.4
10 Итого: производственная себестоимость	1139592,47	1005239,3	
11 Внепроизводственные (коммерческие) расходы	17093,88	15078,6	1,5 % от п. 10
12 Обязательные налоги и платежи	92534,9	81625,43	8% от (п. 10 + п. 11)
13 Итого: полная себестоимость	1249221,26	1101943,32	(п.10 + п. 11 + п. 12)
14 Плановые накопления (прибыль)	312305,3	275485,8	25 % от п. 13
15 НДС	281074,7	247937,2	18 % от (п. 13 + п.14)
16 Свободная оптовая цена стандового образца	1842601,3	1625366	(п. 13 + п.14 + п. 15)

При расчете цены стандового образца принята система оценки стоимости двигателя по удельному весу отдельного агрегата. Полная себестоимость стандового образца ЖРД приблизительно определяется по формуле:

$$C_{ЖРД} = \frac{C_{уз} \times 100}{Y_{уз}}$$

где $C_{ЖРД}$ – цена узла, элемента ЖРД;

$U_{уз}$ - удельный вес узла в структуре себестоимости ЖРД;

$$C_{ЖРД} = \frac{18426012 \times 100}{12} = 15355010,7.$$

Расчет затрат на проектирование, производство и испытание ЖРД представлены в таблицах 3.19 – 3.23.

Таблица 3.19 - Расчёт стоимости материалов

Наименование материалов	Ед. изм.	Норма	Цена, руб.	Сумма, руб.	Возрастные отходы (вычитаются)		
					Количество	Цена за единицу, р.	Сумма, р.
Сырье							
1. Сталь 07X16H6	кг	19	390	7410	4,6	32	147,2
2. Сталь 03X12H10MTP-ВД	кг	27	450	12150	5,3	35	185,5
3. ХН55МБЮ-ВД (ЭП666)	кг	16	1290	20640	1,8	60	108
Сталь 12X18H10T	кг	9	324	2916	2,1	15	31,5
Титан BT-5	кг	3	1020	3060	0,4	80	32
Текстолит ПТК сорт 1	кг	3	453	1359	-		-
Проволока 12X18H10T-0,8 TC	м	8,5	263	2235,5	-		-
Св. 03X19H15Г6M2AB 2	м	3,8	450	1710	-		-

Продолжение таблицы 3.19							
Св. проволока 06X15H6M15	м	13,11	920	12066,7	-		-
Порошок нихрома ПХ20Н80 (56-24, 56-26)	кг	0,8	17320	13856	-		-
Итого основных материалов:				64932,8			504,2
Итого с учетом до- ставки				71426,1			
Покупные детали							
2.1 ПГИ	кг			0,06	2000	1200	-
2.2 Датчики	шт.			1	5000	5000	-
2.3 Подшипники	шт.			4	1000	4000	-
Итого:						10200	

Таблица 3.20 - Основная заработная плата производственных рабочих, занятых изготовлением ЖРД, р.

Наименование работ по изготовлению ЖРД	Трудоемкость работ, нормо-ч	Среднечасовая тарифная ставка, р./ч.	Основная заработная плата с учетом премии (30%)
1	2	3	4
1.1 Корпус турбины	271	45	15853,5
1.2 Корпус насоса окислителя	231	45	13513,5
1.3 Крыльчатка окислителя	228	50	14820
1.4 Крыльчатка горючего	228	50	14820
1.5 Сопловой аппарат	192	50	12480
1.6 Колесо турбины	315	50	20475
1.7 Сборка	825	45	48262,5
Итого:	2290		140224,5

Цена товарного образца проектируемого ЖРД определяется по формуле:

$$C_{нов}^{тов.обр} = \frac{C_{гидр} + n C_{ст} \cdot K_{пр}}{n-1}$$

где $C_{гидр}$ – стоимость проведения гидравлического испытания;

n – количество ЖРД в товарной партии;

$C_{ст}$ – стоимость стендового образца ЖРД;

$K_{пр} = 1$ – коэффициент преемственности.

Продолжительность КВИ – 10 пусков с наработкой 3200 с, продолжительность КТИ-I и КТИ-II по 90 с.

Таблица 3.21 – Расчёт стоимости технологического топлива на один пуск двигателя

Статьи затрат	Общая продолжительность пусков, сек	Расход, кг/с	Расход на программу, т	Технолог. потери, т	Расход всего, т	Цена 1 тонны, руб.	Стоимость всего, руб.
O ₂	3200	42,34	135,48	0,203	135,68 3	1640	222520,1 2
CH ₄	3200	12,45	39,84	0,059	39,894	2660	106118,0 4
Азот газ, м. куб.					1235,2 6	5	6176,3
Азот жидкий, т.					2,6	3089	8031,4
Транспортные расходы:							
O ₂ 8,4%							18691,69
CH ₄ 8,4%							8913,91
Итого:							370451,4 6

Таблица 3.22 – Расчёт заработной платы производственных рабочих и ИТР на проведение КВИ

№ отдела	Трудоёмкость на единицу по нормам	Трудоёмкость в ч/м	Стоимость 1 ч/м
1	2	3	4
1	0,08	3000.00	250,6
2	20,41		61234,2
3	5,42		16212,69
4	2,15		6453,4
5	0,72		2172
6	2,43		7289
7	1,4		4198
8	2,17		6516
9	0,05		167
10	0,2		605,7
11	0,23		668,3
12	0,89		2673
13	0,03		8354
Итого:	36,18		155970

Таблица 3.23 – Калькуляция на проведение одного испытания двигателя

№	Статьи затрат	Сумма, руб.
1	Основные материалы	8974,5
2	Технологическое топливо	370451,46
3	Заработная плата	202761
4	Отчисления на социальные нужды	76440,9
5	Накладные расходы (628% от п.3)	1273339,08
6	Себестоимость	1931967
7	Прибыль (25% от п.6)	482992
8	Цена	2414958

Итого, стоимость проведения КВИ – 2414958 руб.

Стоимость КТИ – I и КТИ – II составляет 105397,3 руб. каждое. Тогда ориентировочная цена товарного образца проектируемого двигателя будет равна:

$$Ц_m = \frac{2414958 + 5 \times (15355010,7 \cdot 1 + 105397 + 105397)}{5 - 1} = 20060995,4$$

Экономический эффект от производства и использования нового ЖРД определяется по формуле, которая учитывает разницу цен базового и нового двигателя, а также экономию издержек у потребителя, которую новый двигатель позволяет получить в процессе эксплуатации:

$$\mathcal{E} = (K_b \cdot a) - K_{np} + \frac{(C_{бИЗД} \cdot a - C_{пИЗД})}{P_{ам} + E_n}$$

где K_b, K_{np} - капитальные вложения в производственные фонды на приобретение (разработку и изготовление) единицы базового и проектируемого варианта двигателя, р

$C_{бИЗД}, C_{пИЗД}$ - годовые эксплуатационные издержки потребителя на потребителя при использовании базового и нового ЖРД;

a = коэффициент эквивалентности нового и базового ЖРД,

$$a_1 = \frac{20}{20} = 1; a_2 = \frac{120}{100} = 1,2; a_3 = \frac{365}{320} = 1,05$$

$$a = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 = 1.27$$

$P_{ам} = 0,25$ – доля амортизационных отчислений;

$E_n = 0,15$ – нормативный коэффициент экономической эффективности

$$K_b = Ц_{нов}^{мос} \times k_{np,mm}$$

где $k_{np,mm}$ - коэффициент учитывающий затраты на проектирование, транспортировку, установку и монтаж ЖРД у потребителя. $k_{np,mm} = 1,1$

$$K_{\bar{o}} = 13544716,7 \times 1,1 = 14899188,3$$

$$K_{np} = 20060995,4 \times 1,1 = 22067095.$$

Тогда

$$\Theta = 14899188,3 \cdot 1,27 - 22067095 + \frac{10060463,9 \cdot 1,27 - 9736726,03}{0,25 + 0,15} = 4455032p.$$

По данной методике были проведены расчёты технических уровней оцениваемого образца с базовым. Полученные данные сведены в табл. 3.24.

Таким образом, в результате использования вместо базового двигателя нового с улучшенными техническими показателями потребитель получит экономический эффект в размере 4455032 p.

Таблица 3.24 - Сопоставление оцениваемого образца с базовым образцом

№	Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя	
				Проектируемый	Базовый
1	Давление в камере сгорания	P_K	<i>атм</i>	120	100
2	Удельный импульс тяги	$I_{уд.}$	<i>с</i>	365	320
3	Тяга двигателя	R	<i>т</i>	20	20
4	Массовый расход горючего	$\dot{m}_Г$	$\frac{кг}{с}$	12,453	18,94
5	Массовый расход окислителя	\dot{m}_O	$\frac{кг}{с}$	42,341	43,56
6	Время работы	τ	<i>с</i>	300	310
7	Соотношение компонентов	k_M	–	3,5	2,3
8	Стоимость двигателя	S	<i>р.</i>	15355010	13544716

3.7.2 Оценка технического уровня ЖРД

В процессе разработки новой техники, одной из важнейших задач является обеспечение ее высокого технического уровня и конкурентоспособности. Задача обеспечения высокого технического уровня тесно связана с проблемой оценки технического уровня объекта техники [8].

Основанием для построения прогноза служит результат анализа технико-экономического уровня отечественной и зарубежной техники по данным литературной информации и патентным материалам, а также итоги тщательного изучения условий эксплуатации будущего изделия.

Критериями технического уровня оцениваемого изделия является:

1) Превышает высшие мировые достижения, если каждое из значений выбранного для сопоставления показателей превышает более чем на 5% соответствующие значения показателей каждого аналога.

2) Соответствует высшему мировому уровню, если отклонения значений параметров оцениваемого образца и аналога находятся в пределах $\pm 3\%$.

3) Не соответствует высшему мировому уровню, если эти отклонения в худшую сторону превышают 3%.

Оценка проводится в два этапа: экспертный и расчетный.

Экспертный этап предусматривает сравнение значений основных показаний технического уровня оцениваемого изделия и выбранных аналогов.

Расчетный этап оценки технического уровня продукции машиностроения проводится в случае, если отклонения значений основных показателей оцениваемых изделий и аналогов превышает вышеуказанные пределы, что не позволяет сделать однозначный вывод.

Экспертный этап оценки позволяет сделать однозначный вывод о степени соответствия ЖРД мировому уровню.

Проведем расчетный этап оценки технического уровня ЖРД по совокупности показателей. Обобщённые показатели степени соответствия оцениваемого двигателя мировым достижениям рассчитываются по относительным показателям сопоставляемости.

$$q_i = \frac{P_i}{P_{ia}},$$

где P_i – абсолютное значение i -го показателя оцениваемого изделия;

P_{ia} – абсолютное значение i -го показателя аналога.

При сопоставлении абсолютных величин параметров, уступающих аналогам, и относительных технических параметров применяется формула:

$$q_i = \left(\frac{P_i}{P_{ia}} \right)^{-1}.$$

Обобщающий показатель технического уровня изделия определяется по формуле:

$$K_{\text{ТУ}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n},$$

где n – количество оценочных сопоставляемых показателей продукции, включая основные и дополнительные показатели.

При этом изделие может иметь высокий технический уровень, средний и низкий, если:

Если $K_{\text{ТУ}} < 1$, то изделие имеет низкий технический уровень, не соответствующий мировому.

Если $K_{\text{ТУ}} > 1$, то изделие имеет высокий технический уровень, соответствующий мировому.

Оценка технического уровня продукции машиностроения производится путем сопоставления значений показателей оцениваемой продукции с соответствующими показателями выбранных аналогов.

$$q_i = \begin{cases} \frac{P_i}{P_{\delta i}} & \text{- если предпочтительно возрастание } i\text{-го} \\ & \text{параметра (например, выходная мощность} \\ & \text{усилителя);} \\ \frac{P_{\delta i}}{P_i} & \text{- если предпочитается убывание численного} \\ & \text{значения параметра (например, потребляемая} \\ & \text{мощность радиоприемника);} \end{cases}$$

Наряду с вышеизложенной методикой расчета комплексного показателя технического уровня имеет место расчет обобщения показателя степени соответствия оцениваемого ТНА высшим мировым достижениям.

Критериями технического уровня оцениваемого изделия является:

1. Превышает высшие мировые достижения, если каждое из значений выбранного для сопоставления показателей превышает более чем на 5 % соответствующие значения показателя аналога;

2. Соответствует высшему мировому уровню, если отклонения значений параметров оцениваемого образца и аналога находится в пределах $\pm 3\%$;

3. Не соответствует высшему мировому уровню, если эти отклонения в худшую сторону превышают 3 %.

Обобщенные показатели степени соответствия оцениваемого ЖРД мировым достижениям рассчитываются по относительным показателям сопоставляемости $q_i = \frac{P_i}{P_{iа}}$,

$$q_i = \frac{P_i}{P_{iа}}$$

где P_i – абсолютное значение i -го показателя оцениваемой продукции;

$P_{iа}$ – абсолютное значение i -го показателя аналога;

$i = 1, 2, \dots, n$;

n – количество оценочных сопоставляемых показателей продукции, включая основные и дополнительные показатели.

Обобщенный показатель степени соответствия оцениваемого образца высшим мировым достижениям рассчитывается по формуле

$$K_{\text{ты}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} .$$

При этом $K_{\text{ты}}$ может быть меньше единицы (технический уровень образца не соответствует мировому уровню); равным или большим единице (технический уровень образца соответствует мировому уровню).

$$q_1 = \frac{20}{20} = 1$$

$$q_2 = \frac{120}{100} = 1,2$$

$$q_3 = \frac{365}{320} = 1,14$$

$$q_4 = \left(\frac{12,453}{18,94} \right)^{-1} = 1,52$$

$$q_5 = \left(\frac{42,341}{43,56} \right)^{-1} = 1,02$$

$$q_6 = \left(\frac{3,5}{2,5} \right)^{-1} = 0,65$$

$$q_8 = \left(\frac{15355010}{13544716} \right)^{-1} = 0,88$$

$$q_8 = \frac{300}{310} = 0,96$$

$$K_{\text{TY}} = \frac{1 + 1,2 + 1,14 + 1,52 + 1,02 + 0,65 + 0,96 + 0,88}{8} = 1,057$$

Значение показателя $K_{\text{TY}} = 1,057$ дает основание для вывода о том, что проектируемый двигатель соответствует мировому уровню. Секторограмма показателей технического уровня проектируемого и базового вариантов двигателей (таблица 3.24) представлена на рисунке 3.16.

На основе результатов оценки технического уровня продукции машиностроения разрабатываются и осуществляются меры по доведению ее технического уровня до высших мировых достижений с учетом его эффективности.

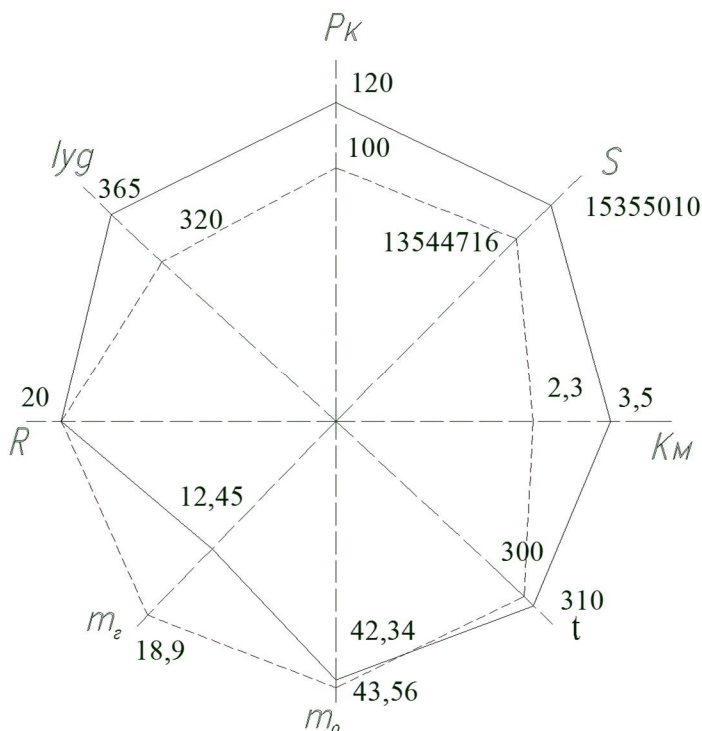


Рисунок 3.16 - Секторограмма проектируемого и базового вариантов двигателя

3.7.3 Организация и планирование конструкторской подготовки производства

Под КПП понимаем совокупность процессов конструирования новых изделий, разработки конструкторской документации и её корректировки по результатам изготовления и испытания опытных и головных испытаний. ГОСТ 2.103 – 68.

Первые две стадии – техническое задание и техническое предложение – представляют собой работы предпроектного характера.

Стадии эскизного, технического и рабочего проектов относятся ко второй группе работ – к проектным.

В ходе их выполнения разрабатываются конструкторско – технологические основы будущего изделия и осуществляется изготовление всей технической документации не обходимой для выпуска изделий в производственных условиях.

3.7.4 Технический проект. Содержание работы

Разработка технических решений изделия и его составных частей; выполнение необходимых расчётов, том числе подтверждающих технико – экономические показатели установленные ТЗ; выполнение необходимых принципиальных схем, схем соединений и пр; разработка и обоснование технических решений, анализ конструкции на технологичность; оценка изделия на соответствие требованиям эргономики, технической эстетики; оценка возможности транспортирования, хранения, а также монтажа изделия на место его применения; оценка эксплуатационных данных изделия; окончательное оформление заявок на разработку и изготовление новых изделий и материалов, применяемых в разрабатываемом изделии; проверка изделия на патентную частоту конкурентоспособность, оформление заявок на изобретения; выявление номенклатуры покупных изделий, согласование применения покупных изделий, согласование габаритных, установочных и

присоединительных размеров с заказчиком или основным потребителем; оценка технического уровня и качества изделия; разработка чертежей сборочных единиц и деталей, проверка соответствия принимаемых решений требованиям техники безопасности и производственной санитарии; составление перечня работ, которые следует провести на стадии разработки рабочей документации в дополнение и уточнение работ, предусмотренных техническим предложением, эскизным проектом. Этапы конструкторской подготовки ЖРД и трудоемкость представлены в таблицах 3.25 – 3.27

Таблица 3.25 – Этапы конструкторской подготовки ЖРД и их содержание

Наименование этапа	Содержание этапа	Удельный вес
1	2	3
Техническое задание ГОСТ 15.001 – 73	Установление основного назначения двигателя, определение технических и тактико-технических характеристик, показателей и технико – экономических требований. Согласование проекта технического задания на разработку двигателя.	10%
Техническое предложение ГОСТ 2.118 – 73	Разработка комплекса конструкторских документов, содержащих технические и технико – экономические обоснования целесообразности разработки документации. Разработка технического предложения на двигатель.	20%
Эскизный проект ГОСТ 2.119 – 73	Конструкторская и технологическая проработка основных узлов двигателя, установление соответствия выходных параметров ТЗ. Разработка эскизного проекта на двигатель.	25%
Технический проект ГОСТ 2.120 – 73	Выработка окончательного представления о конструкции двигателя и его отдельных узлов, принятие необходимых технических решений, уточнение параметров нового двигателя (термодинамический, тепловой расчёт, расчёт параметров КС).	20%

Продолжение таблицы 3.25		
Рабочая документация ГОСТ 16.504 – 81	Разработка конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытных образцов установочной серии и установившегося серийного или массового производства: корректировка документации после изготовления и испытания опытных образцов.	25%

Таблица 3.26 – Трудоемкость по группам чертежей.
Этап – технический проект

№ п.п	Наименование документов	Формат	Кол. чертежей	Норма времени	Трудоемкость выполнения
1.	Изучение технического задания	A4	28	4,30	120,4
2.	Оценка параметров	A4	93	4,3	399,9
3.	Проработка ТЗ	A4	95	4,3	408,5
4.	Особенности конструкции	A4	105	4,3	451,5
5.	ПГС	A0	10	43,2	432
6.	Конструкция ПГС	A4	57	4,3	245,1
7.	Варианты	A4	115	4,3	494,5
8.	Оптимальные варианты	A4	53	4,3	227,9
9.	Обоснование выбора	A4	50	4,3	215
10.	Расчет КС	A4	86	4,3	369,8
11.	Параметры КС	A4	105	4,3	451,5
12.	Конструкция КС	A4	132	4,3	567,6
13.	Параметры сопла	A4	86	4,3	369,8
14.	Дозвуковая часть сопла	A1	12	12,9	154,8
15.	Сверхзвуковая часть сопла	A1	18	12,9	232,2
16.	Головка смесителя	A1	12	12,9	154,8
17.	Форсунка О	A3	43	8,6	369,8
18.	Форсунка Г	A3	43	8,6	369,8
19.	Коллектор	A1	11	12,9	141,9
20.	Узлы качания КС	A1	20	12,9	258
21.	Параметры ГГ	A4	103	4,3	442,9
22.	Общий вид ГГ	A1	15	12,9	193,5
23.	Камера сгорания ГГ	A1	8	12,9	103,2
24.	Конструкция ГГ	A4	130	4,3	559

Продолжение таблицы 3.26					
25.	Днище наружное	A3	84	8,6	722,4
26.	Днище внутренние	A3	96	8,6	825,6
27.	Параметры ТНА	A4	130	4,3	559
28.	Турбина	A1	15	12,9	193,5
29.	Насос Г	A1	20	12,9	258
30.	Насос О	A1	23	12,9	296,7
31.	Сопловой аппарат	A4	60	4,3	258
32.	Конструкция ТНА	A4	60	4,3	258
33.	Корпус ТНА	A1	15	12,9	193,5
34.	Напорные характеристики	A4	55	4,3	236,5
35.	Отдельные узлы	A1	50	12,9	645
36.	Дроссель	A1	18	12,9	232,2
37.	Регулятор	A1	23	12,9	296,7
38.	Клапан	A1	5	12,9	64,5
39.	Автоматика	A1	63	12,9	812,7
40.	Технологичность	A4	137	4,3	589,1
41.	Перечень работ для следующей стадии проектирования	A4	260	4,3	1118
42.				Итого	15292,8

Необходимое количество человек для каждого этапа конструкторской подготовки

$$C = \frac{T_p}{F_m \cdot \kappa_{вн} \cdot T_d} \quad (84)$$

где T_p - трудоёмкость этапа, (н·ч);

F_m - месячный фонд времени, (час);

$\kappa_{вн}$ - коэффициент выполнения норм;

T_d - директивный срок, (мес.).

Длительность для каждого этапа конструкторской подготовки

$$T_{цп} = \sum_1^{mp} \frac{T_p \cdot \kappa_n}{P \cdot \kappa_{вн} \cdot T_{см}} \quad (85)$$

где $T_{цп}$ - цикл комплекса работ, (дни);

T_p - трудоёмкость данной работы, (н·ч);

κ_n - коэффициент служащий для перевода рабочего времени в календарное;

T_{cm} - продолжительность рабочего дня, (ч);

P - количество работников занятых в выполнении данных работ;

Таблица 3.27 – Трудоёмкость по этапам конструкторской подготовки ЖРД

Наименование этапа	Удельный вес	Трудоёмкость	Кол-во людей
1	2	3	4
Техническое задание ГОСТ 15.001 – 73	10%	7646	5
Техническое предложение ГОСТ 2.118 – 73	20%	15293	9
Эскизный проект ГОСТ 2.119 – 73	25%	19116	11
Технический проект ГОСТ 2.120 – 73	20%	15293	9
Рабочая документация ГОСТ 16.504 – 81	25%	19116	11
Итого:	100%	76464	45

Необходимое количество человек для этапа технического проекта:

$$C = \frac{T_p}{F_m \cdot \kappa_{вн} \cdot T_{cm}} = \frac{15293}{160 \cdot 1,1 \cdot 12} = 8 \text{ человек} \quad (86)$$

Длительность для этапа технического проекта:

$$T_{цп} = \sum_1^{mp} \frac{T_p \cdot \kappa_n}{P \cdot \kappa_{вн} \cdot T_{cm}} = \frac{15293 \cdot 1,84}{8 \cdot 1,1 \cdot 8} = 399 \text{ дней}. \quad (87)$$

Заключение

В учебном пособии изложены цели, задачи и результаты преддипломной практики, а также освещены вопросы, касающиеся выполнения выпускной квалификационной работы, связанной с проектированием заданной ДУ с ЖРД.

Функциональное проектирование включало разработку ПГС с рассмотрением последовательности запуска и остановки двигателя, выбор функциональных схем управления и регулирования ЖРД и разработку схемы его компоновки.

В качестве примера выполнения выпускной квалификационной работы приводится расчет и проектирование ЖРД с компонентами топлива СПГ + кислород. Для двигательной установки составлена оптимальная ПГС, позволяющая использовать данное изделие в составе третьей ступени ракеты носителя. В ПГС предусмотрены присоединительные места подключения дополнительной схемы питания рулевых приводов качания камеры в кардане для управления вектором тяги. Проведен расчет КС и сопла, выбрана их оптимальная геометрия, обеспечивающая минимальные размеры камеры. Благодаря программному обеспечению КБХА выполнен расчет охлаждения камеры. ТНА, используемый в схеме, обеспечивает заданные расходы компонентов топлива и требуемое давление в КС. В качестве спецчасти в полном объеме рассмотрен вопрос исследования применения подшипников скольжения для ТНА. Кроме того, в дипломном проекте приведены такие разделы как организационно-экономическая часть, охрана труда и окружающей среды. Организационно-экономическая часть является неотъемлемой составляющей дипломного проекта, обеспечивает вместе с техническими разделами комплексный характер проекта. При выполнении организационно-экономической части использовались экономико-математические методы и электронно-вычислительная техника. В процессе создания и работы с двигателем особое внимание нужно уделять охране труда, так как имеет место много вредных производственных факторов, снижающих производительность труда. Вопросы, касающиеся экологической безопасности, также рассмотрены в процессе выполнения дипломного проекта. По полученным результатам дипломного проекта можно сделать вывод, что разработанная ДУ полностью соответствует предъявляемым к ней требованиям, являясь при этом конкурентоспособной на мировом рынке высоких технологий.

Список литературы

1 СТН ВГТУ62-2007. Текстовые документы (курсовые работы (проекты), рефераты, отчеты по лабораторным работам, контрольные работы). Правила оформления. – Воронеж: ВГТУ, 2007. – 53 с.

2 Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов/ М. В. Добровольский; под ред. Д.А. Ягодникова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: МГТУ им. Баумана, 2006. - 488 с.

Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей: Учебник для вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; Под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

Бережинский Р.А., Горохов В.Д., Коробченко В.А. Основы проектирования камер сгорания ЖРД: Учеб. пособие / Под общ. ред. В.С.Рачука. Воронеж: Воронеж. гос.техн.ун-т, 2004. 129 с/

4 Ефимочкин А.Ф. Проектирование принципиальных пневмогидравлических схем жидкостных ракетных двигателей: Учеб. пособие / А. Ф. Ефимочкин. - Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2010. - 264 с.

5 Рубинский, В.Р. Теория, расчет и проектирование ЖРД: Учеб. пособие / В. Р. Рубинский, А. В. Кретинин, И. Г. Дроздов. - Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2010. - 144 с.

6 Иванов А.В. Расчет и профилирование шнекоцентробежного насоса турбонасосного агрегата ЖРД: Учеб. пособие / А.В. Иванов. - Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2010. - 120 с.

7 Иванов А.В. Конструкция и проектирование уплотнений проточной части насосов и турбин ТНА ЖРД: Учеб. пособие / А.В. Иванов, В.А. Коробченко, А.В. Шостак. - Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2005. - 86 с.

8 Билинкис В.Д. Методы оценки технического уровня и конкурентоспособности продукции: Учеб. пособие / В.Д. Билинкис. – Воронеж: ВГТУ, 2000. – 89 с.

Оглавление

Введение.....	3
1 Преддипломная практика.....	5
1.1 Цель преддипломной практики.....	5
1.2 Структура и содержание преддипломной практики.....	8
2 Дипломное проектирование.....	10
2.1 Выбор темы.....	10
2.2 Структура, содержание и объём.....	12
2.3 Оформление дипломного проекта.....	19
3 Проектирование двигателя на компонентах топлива «кислород-метан».....	28
3.1 Выбор топлива.....	29
3.1.1 Обоснование выбора топливной пары.....	29
3.1.2 Энергетические требования.....	30
3.1.3 Эксплуатационные требования.....	32
3.1.4 Экономические требования.....	33
3.1.5 Основные физико-химические и теплофизи- ческие свойства компонентов топлива ЖРД....	35
3.2 Пневмо-гидравлическая схема (ПГС) двигателя..	37
3.2.1 Выбор схемы.....	37
3.2.2 Циклограмма работы двигателя.....	46
3.3 Расчет камеры.....	50
3.3.1 Выбор давления в камере сгорания.....	50
3.3.2 Термодинамический расчет камеры сгорания и сопла.....	52
3.3.3 Определение формы и размеров камеры сгорания.....	61
3.3.4 Профилирование сопла.....	65
3.3.5 Расчет охлаждения двигателя.....	74
3.4 Расчет ТНА.....	101
3.5 Проектирование подшипников скольжения для ТНА.....	114
3.6 Безопасность и экология.....	127

3.6.1 Анализ потенциально опасных и вредных факторов.....	127
3.6.2 Меры защиты от опасных и вредных факторов.....	130
3.6.3 Расчет искусственного освещения.....	135
3.6.4 Охрана окружающей среды.....	137
3.7. Организационно - экономическая часть.....	141
3.7.1 Определение экономического эффекта.....	141
3.7.2 Оценка технического уровня ЖРД.....	153
3.7.3 Организация и планирование конструкторской подготовки производства	158
3.7.4 Технический проект. Содержание работы	158
Заключение.....	163
Список литературы.....	164

Учебное пособие

Иванов Андрей Владимирович
Скоморохов Геннадий Иванович
Шматов Дмитрий Павлович

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ:
ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В авторской редакции

Компьютерный набор Г.И. Скоморохова

Подписано к изданию 15.04.2016.
Объем данных 1,3 Мб.

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