

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

**Борисов В. А., Жижкин А. М., Мелентьев В.С.**

## **Конструирование ракетных двигателей**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

УДК 621.455.(075)

Авторы: **Борисов Валерий Александрович,**  
**Жижкин Александр Михайлович,**  
**Мелентьев Владимир Сергеевич**

Рецензент: Егорычев В. С., доц. кафедры ТДЛА,

**Борисов, В. А.** Конструирование ракетных двигателей [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Борисов, А. М. Жижкин, В. С. Мелентьев; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии приведен порядок выполнения и требования к курсовому проекту по дисциплине "Конструирование основных узлов и систем ракетных двигателей".

Конструирование камеры ЖРД предлагается выполнять с использованием пакетов 3D и ANSYS. Приведен список возможных тем (спецтем), предлагаемых для самостоятельной глубокой проработки элементов двигателя.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по программе подготовки специалистов по направлению 160300 "Двигатели летательных аппаратов", специальность 160302.65 – "Ракетные двигатели",

а также по специальности 160700.65 "Проектирование авиационных и ракетных двигателей", специализация "Инновационные технологии в ракетном двигателестроении" и изучающих дисциплину "Конструирование основных узлов и систем ракетных двигателей".

Разработано на кафедре КиПДЛА.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Содержание курсового проекта.....	6
2. Работа над проектом.....	7
2.1. Функциональное проектирование двигательной установки.....	7
2.2. Конструирование камеры двигателя .....	10
2.2.1. Разработка и оптимизация системы теплозащиты.....	10
2.2.2. Конструирование элементов камеры.....	11
2.3. Расчет прочности и оптимизация элементов камеры.....	15
2.4. Разработка компоновочной схемы двигателя.....	16
2.5. Выполнение спецтемы.....	18
3. Требования к пояснительной записке и графической части проекта .....	20
3.1. Пояснительная записка .....	20
3.2. Графическая часть проекта .....	22
4. Порядок защиты курсового проекта .....	23
Библиографический список.....	25
<i>Приложения</i> .....	27

## Введение

Курсовой проект по курсу "Конструирование основных узлов и систем ракетных двигателей" должен закрепить и расширить теоретические знания и практические навыки конструирования по данной дисциплине, способствовать стремлению к поиску самостоятельных решений инженерных задач.

Курсовой проект по данной дисциплине является продолжением курсовой работы по дисциплине "Теория и расчет ракетных двигателей", в которой проведён расчет основных параметров ракетного двигателя, определены геометрические размеры камеры, рассчитано смесеобразование и выбрана структурная схема двигательной установки.

Из пояснительной записке к этой работе для выполнения проекта берутся следующие параметры:

- тяга и пределы её изменения;
- компоненты топлива и их расходы;
- среднее массовое соотношение компонентов топлива и пределы его изменения;
- соотношение компонентов в ядре потока и в пристеночном слое газа;
- структурная схема двигателя;
- температура газа на входе в смесительную головку камеры (в системе с дожиганием);
- время работы двигателя в течение одного включения;
- число включений в полёте;
- изменение давления газа по длине сопла;
- температура газа на входе в сопло в ядре потока и в пристеночном слое;
- перепад давления компонентов топлива на форсунках;
- схемы головки камеры и расположение форсунок на внутреннем днище;
- контур газодинамического тракта и его размеры;
- давление охладителя на входе и выходе из тракта охлаждения камеры.

Дополнительно к этим данным в задании на курсовой проект задаётся:

- назначение двигательной установки (ДУ);
- участие ДУ в управлении вектором тяги летательного аппарата (ЛА);
- участие ЖРД в наддуве баков ЛА.

## 1. Содержание курсового проекта

Курсовой проект состоит из следующих основных частей:

- функционального проектирования двигательной установки - 20% объёма;
- конструирования одного из основных узлов ДУ - 30 ...40 %;
- выполнения схемы компоновки двигателя - 10%;
- разработки рабочего чертежа одной детали  
и технологической части проекта - 5%;
- спецификация - 5...15 %;
- пояснительной записки с необходимыми описаниями  
и расчетами теплозащиты и прочности камеры - 20%.

Функциональное проектирование заключается в разработке пневмогидравлической схемы (ПГС) ДУ, циклограммы запуска и останова двигателя, а также в разработке структурных схем управления и регулирования на основном режиме работы. ПГС разрабатывается на основе структурной схемы двигателя, выбранной в курсовой работе по дисциплине "Теория и расчет ракетных двигателей".

В качестве одного из узлов ДУ для конструирования в стандартном проекте задаётся камера ЖРД.

Необходимо выполнить графическую модель камеры в одном из редакторов 3D в масштабе 1:1. Используя эту модель, следует получить продольный разрез камеры в 2D и оформить его, как сборочный чертёж\*.

---

По согласованию с преподавателем чертёж камеры может быть выполнен в 2D, а в 3D сделаны отдельные сборочные единицы.

На чертеже должны быть показаны сборочные единицы и детали, которые необходимы для окончательной сборки изделия, проставлены необходимые размеры и указаны технические требования к сборке и контролю изделия.

Схема компоновки двигателя также выполняется в 3D в уменьшенном масштабе. На ней в виде внешних контуров изображаются основные агрегаты ЖРД: камера, ТНА, ЖГГ, основные клапаны и регуляторы, обязательно крепление двигателя.

Рабочий чертёж выполняется в 2D для детали, указанной преподавателем. В нём должен быть указан материал детали и представлены все размеры и технические требования, необходимые для её изготовления.

В технологической части проекта обычно приводится схема последовательности сборки камеры и её контроля. Помимо этого, может быть представлена схема технологии изготовления детали, представленной на рабочем чертеже.

## **2. Работа над проектом**

### **2.1. Функциональное проектирование двигательной установки**

Прежде всего, производится функциональное проектирование ДУ. На основании данных "Пояснительной записки по курсу теории РД" и сформулированных требований выбирается конструктивная схема двигательной установки, которая может представлять собой одно- или многокамерный двигатель или же связку одно- или многокамерных двигателей [1,2]. Если эта схема была уже выбрана при выполнении курсовой работы на кафедре ТДЛА, то студент должен согласовать её с консультантом проекта. Желательно также выбрать прототип проектируемого двигателя.

Все функциональные системы ЖРДУ представляют собой единую пневмогидроэлектрическую систему (ПГЭС). Документально её оформляют в

виде принципиальной схемы (пневмогидроэлектрической схемы – ПГЭСх) [1], на которой изображают все агрегаты системы и связи между ними. Чтобы не усложнять восприятие, её представляют в виде двух схем – пневмогидравлической (ПГСх) и электрической (ЭСх).

Электрическую схему в проекте не рассматривается.

При разработке ПГСх исходят из структурной схемы ЖРД, на которой видны связи между камерой, ТНА и ЖГГ. Теперь на этой схеме надо расположить агрегаты управления и автоматики, необходимые для подготовки к запуску, запуска, работе на основном режиме и остановка двигателя. Разработанная в проекте ПГСх должна включать и баковую часть схемы, на которой показано, как обеспечивается наддув топливных баков.

При выполнении этой работы используют примеры ПГСх двигателей, изученных во время лабораторных работ, а также приведённых в пособиях [1,2,3] и в других. При вычерчивании ПГСх следует пользоваться условными обозначениями, указанными в ГОСТ 29763-77. Эти обозначения приведены в приложении 1 пособия [1]. Одновременно необходимо составить перечень агрегатов, изображённых на ПГСх. Выбирая тип агрегата, надо учитывать число включений его в полёте, время срабатывания, вид рабочего вещества, текущего через него, и расход этого вещества [3]. Для разъяснения конструкции ТНА в ПГСх может быть вставлена его конструктивная схема, ранее разработанная в курсе «Динамика и прочность ДЛА».

*Рассмотрим* основные операции, выполнение которых должна обеспечивать ПГСх.

*На первом этапе запуска* (предпусковой подготовке) необходимо выполнить:

- предстартовый наддув баков;
- включить продувку трубопроводов за главными клапанами по линии окислителя (иногда и горючего) инертным газом – азотом или гелием;

-заполнить жидкими компонентами полости трубопроводов и насосов до главных клапанов. При криогенных компонентах этой операции предшествует захлаживание заполняемых частей конструкции.

*На втором этапе* (включения ТНА) необходимо обеспечить:

- раскрутку ТНА;
- включение в работу ЖГГ.

*На третьем этапе* (включения камеры двигателя) необходимо выполнить:

- открытие главных клапанов в магистралях подачи компонентов в камеру;

Открытие клапанов должно проводиться в определённой последовательности с тем, чтобы обеспечить заданное опережение поступления одного из компонентов (чаще всего окислителя) в камеру по отношению к другому.

- включение зажигания в камере;

В результате этого происходит воспламенение компонентов топлива и двигатель выходит на промежуточный режим работы или сразу на основной.

*При работе на основном режиме ЖРДУ* является исполнительным органом следующих систем ЛА:

- регулирования кажущейся скорости;
- системы одновременного опорожнения баков;
- управления вектором тяги.

Кроме того, в двигателе могут быть предусмотрены собственные системы регулирования тяги или соотношения компонентов в камере и ЖГГ.

*Система останова ЖРДУ* должна обеспечить безопасность выключения двигателя и минимальный импульс последствий тяги.

При выборе той или иной системы необходимо обосновать её применение, т.е. указать, почему она обеспечивает наиболее эффективное проведение данной операции.

## 2.2. Конструирование камеры двигателя

Конструирование проводится на основании полученного в результате термогазодинамического расчета газового тракта камеры.

Для формирования элементов конструкции и расчета прочности необходимо знать их температуру. Поэтому расчет регенеративного охлаждения проводится до начала конструирования камеры или (при использовании современных технологий) одновременно с конструированием.

При предварительном расчете теплозащиты элементов камеры используются методики, приведённые в учебных пособиях [1,3,4,6].

### 2.2.1. Разработка и оптимизация системы теплозащиты

В курсовой работе, выполненной на кафедре ТДЛА, в качестве основного способа теплозащиты стенки камеры принято регенеративное охлаждение с учетом пристеночного слоя газа, образованного периферийными форсунками смесительной головки. В курсовом проекте необходимо произвести расчет регенеративного охлаждения для рассматриваемого случая, спроектировать ребрение охлаждающего тракта и, если имеется необходимость, предложить другие мероприятия теплозащиты.

При использовании программы OXLADA также необходимо оптимизировать охлаждение с целью получения меньшей температуры охладителя на выходе и снижения массы сопла.

1) Если по результатам расчета на значительной части сопла плотность теплового потока незначительна (меньше  $0,9 \text{ кВт/м}^2$ ), то следует применять насадок, не имеющий проточного охлаждения. После конструирования насадка следует определить насколько он легче двустенной конструкции

2) У современных камер выходной участок сопла имеет стенку из нержавеющей стали, а стенка критики и камеры сгорания выполняется из материалов с высокой теплопроводностью. Поэтому рассчитываются варианты со стенкой из материалов с различной теплопроводностью (например, X18H10 и БрХ08 или медью). По результатам расчета находится сечение, в котором необходим переход с одного материала на другой. Также определяется на сколько снижается температура охладителя на выходе.

3) Рассчитываются варианты с различным расположением входного коллектора по длине сопла и определяется оптимальное его расположение, обеспечивающее получение меньшей температуры охладителя на выходе.

4) При конструировании охлаждающего тракта необходимо рассмотреть варианты с различными связями (ребра, гофрированная проставка с разными параметрами) с целью получения максимального коэффициента эффективности охлаждения.

### 2.2.2. Конструирование элементов камеры

При выборе конструктивных решений студент ориентируется на уже изученные двигатели, кафедральный электронный банк данных, базу конструктивных решений (приложение 1), атлас чертежей камер [9, 10] и рекомендованную литературу.

Используя эти материалы, студент выбирает конструктивные схемы основных сборочных единиц (СЕ) и производит их конструктивную разработку. Эта разработка заключается в членении основных СЕ на более простые, а последних – на детали, в выборе формы и материалов деталей, вида их соединений, технологии изготовления и в расчете прочности элементов, входящих в силовую систему СЕ. Выходом этой работы должен

быть модель камеры и её сборочный чертёж, из которого понятна конструкция всех элементов и порядок сборки камеры.

Деление камеры на СЕ обусловлено:

- различной конструкцией и технологией изготовления отдельных частей камеры;
- необходимостью их отдельных испытаний;
- отсутствием оборудования для изготовления крупногабаритных конструкций;
- необходимостью установки поясов завесного охлаждения;
- требованиями технологичности изготовления.

В процессе конструирования определяются размеры проходных сечений патрубков, коллекторов и штуцеров, через которые компоненты топлива подводят в камеру.

В настоящее время применяются паяно-сварные камеры, конструкция и технология изготовления которых были разработаны в КБ В.П. Глушко в 1954г. Камеры изготавливают в основном из листового материала, а для соединения их деталей и сборочных единиц используют пайку и сварку [3]. Пайка позволяет изготавливать внутреннее днище головки и стенку корпуса из более теплопроводного материала (например, из хромистой бронзы), а силовые элементы (рубашку корпуса, среднее и наружное днища головки) - из высокопрочной стали. Кроме того, пайка форсунок обеспечивает высокую герметичность полостей головки по сравнению с развальцовкой их торцов. Камеры состоят из двух основных сборочных единиц - смесительной головки и корпуса. Конструкция и порядок проектирования паяно-сварных камер приведена в пособии [3].

### *Конструирование смесительной головки*

В курсовой работе по ТДЛА у студента уже принято расположение форсунок на головке, выбрана их схема и определены размеры внутренних каналов. Для превращения схемных решений в конструктивные необходимо

учесть требования технологии изготовления, опыт конструирования подобных элементов и обеспечить их прочность.

### *Конструирование корпуса камеры*

Корпус камеры (Приложение 1, элемент 2.2) состоит из стенки и рубашки, соединенных между собой по поверхностям пайкой гофрированных проставок или ребер, полученных фрезерованием канавок на наружной поверхности стенки. В настоящее время в основном применяется соединение с помощью ребер.

Преимущества такого соединения заключается в следующем:

- ребра позволяют получить более точные размеры каналов тракта охлаждения;
- спай между ребром и рубашкой работает при более низкой температуре, чем спай гофра со стенкой;
- при ребрах легче обеспечить надлежащую подгонку ребра к рубашке, что устраняет появление непропаев, которые возникают при использовании гофрированной проставки (особенно при значительных изменениях радиуса поперечного сечения корпуса);
- проще проконтролировать качество пайки ребра с рубашкой с помощью рентгеноскопии;
- облегчаются условия работы сварного шва между деталями стенки сборочных единиц в зоне критического сечения, так как он может быть сдвинут от этого сечения вправо или влево.

Поэтому в местах с двойной кривизной (в сужавшейся части и на некотором участке расширяющейся части сопла) используют соединение с помощью ребер, а на остальных участках корпуса - гофров. В более поздних конструкциях часто связи в виде ребер используют по всей длине корпуса

камеры. Однако, следует помнить о том, что фрезерование ребер трудоёмко, особенно в тех случаях, если материалом стенки является нержавеющая сталь или титановый сплав.

*Корпус камеры* делится на две или более основные сборочные единицы. Конструкция элементов корпуса тесно увязана с технологией их изготовления.

### *Конструирование соединений частей камеры*

Обычно базовой сборочной единицей является охлаждаемая регенеративно расширяющаяся часть сопла, базами сборки - ось сопла и его срез.

Перед установкой соединительного кольца часто проводят токарную обработку торцов переходных колец рубашки, так как при сварке стенки могла возникнуть их поводка, а соединительное кольцо должно входить между указанными торцами без зазора. Связано это с тем, что после сварки замыкающего шва соединительного и переходного колец при остывании возникает его стягивание, которое может разрушить ранее сваренный шов между краями стенок. Необходимость токарной обработки торцов рубашки должна быть отражена на сборочном чертеже.

### *Рекомендации по конструированию сварных соединений*

В камере много сварных соединений, рациональная конструкция которых в значительной степени определяет прочность и надёжность изделия.

1. Для изготовления деталей камеры необходимо использовать хорошо свариваемые стали, особенно в тех случаях, когда после сварки невозможно провести термообработку (например, при соединении секций корпуса).
2. При сварке оболочек необходимо использовать сварку встык, которая приводит к меньшей концентрации напряжений, чем сварка внахлёстку.

3. Кромки свариваемых деталей должны иметь примерно одинаковую толщину.
4. Сварные швы рубашки и стенки целесообразно сдвигать относительно друг друга с тем, чтобы не ослаблялась прочность корпуса.
5. Прочность сварных швов часто меньше прочности основного материала. В этом случае для получения равнопрочности целесообразно увеличивать толщину основного материала только в месте сварки. Если это невозможно выполнить, приходится увеличить толщину основного материала всего элемента, что повышает массу конструкции.
6. При изготовлении камеры используют в основном автоматическую сварку в среде аргона или гелия.

### 2.3. Расчет прочности и оптимизация элементов камеры

При конструировании элементов камеры назначается материал деталей и проводится расчет их прочности. При выборе материала деталей следует руководствоваться пособиями [3,11,12,].

Общие вопросы прочности элементов камеры двигателя и методики их расчетов приведены в пособиях [1,2,4].

В курсовом проекте при конструировании камеры обязательно должны быть проведены следующие прочностные расчеты:

1. Расчет общей прочности корпуса камеры.  
Расчет производится с использованием пакета ANSYS, определяются опасные места по длине корпуса и для них считаются коэффициенты запаса. При этом может быть использована параметрическая модель корпуса камеры, расчет которой приводится в работе [15].
2. Расчет прочности смесительной головки, который включает в себя расчет прочности блока днищ и наружного днища (или газоведа).  
Расчет прочности наружного днища производится с использованием

пакета ANSYS. Необходимо оптимизировать наружное днище с целью получения минимальной массы.

Для камер без дожигания – сравнить и выбрать вариант в виде сферического, эллиптического или днища другой формы.

Для камер с дожиганием – вариант газовода с постоянной толщиной стенки или газовод с переменной толщиной (получаемый литьем или сварной).

Прочность блока днищ считается по методикам, приведенным в пособиях [1,2,4]. Эти же пособия используются при выполнении следующих расчетов:

3. Расчет местной прочности стенки корпуса в местах соединения его сборочных единиц (считаются сварные швы).
4. Расчет прочности опор крепления камеры.

## 2.4. Разработка компоновочной схемы двигателя

После разработки конструкции камеры и ПГСх необходимо выбрать и сформировать компоновочную схему двигателя. На ней должны быть изображены все основные агрегаты: камеры, ТНА, ЖГГ, основные клапаны и узлы крепления двигателя. Основанием для выполнения компоновки являются конструктивная схема двигателя, ПГСх и внешние контуры агрегатов.

Рекомендуется компоновочную схему выполнять в масштабе 1:10 на листе формата А3.

### Требования к компоновочной схеме

1. Минимальные размеры двигателя;
2. Короткие трубопроводы, обеспечивающие меньшие гидравлические и тепловые потери;
3. Компенсация температурных деформаций в системе трубопроводы, ТНА - камера (трубопроводы с изгибом, сильфонные вставки).

Для оценки компактности двигателя рекомендуется определять минимальный объем цилиндра, описанный вокруг двигателя при условии, что оси их совпадают.

Внешний вид и основные размеры камеры известны из чертежа. Диаметры трубопроводов определяются по расходу компонентов из уравнения неразрывности

$$F = m_{\text{тр}} / (w \cdot \rho), \quad (1)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения трубопровода;

$m_{\text{тр}}$  - расход компонента;

$w$  - рекомендуемая скорость течения компонента. Для жидких компонентов  $w = 10 \dots 20 \text{ м/с}$ , а для жидкого водорода  $w = 20 \dots 30 \text{ м/с}$ ;

$\rho$  - плотность компонента.

Размеры и особенности модели ТНА должны быть взяты из курсового проекта по дисциплине “Динамика и прочность ДЛА”. Если проектные данные по ТНА разрабатываемого двигателя отсутствуют, то его форму и размеры, как и ЖГГ, предлагается выбрать по аналогам в зависимости от размеров камеры в соответствии с рекомендациями приложения 2. Размеры клапанов, показанных там же, целесообразно назначать, исходя из размеров трубопроводов.

Компоновка должна быть выполнена в одном из графических редакторов 3D. Позиции агрегатов на схеме должны иметь те же номера, что и в ПГСх. Элементы, отсутствующие в ПГСх, поясняются в подрисуночной надписи.

Компоновочную схему помещают в записке вместе с описанием конструкции двигателя.

*Примечание:* Упрощённые модели внешнего вида агрегатов, показанные в приложении 2, представляют собой тела вращения. Однако все они, как и трубопроводы должны располагаться с допустимыми зазорами относительно друг друга и остальных агрегатов, радиусы изгиба трубопроводов должны соответствовать технологическим рекомендациям.

## 2.5. Выполнение спецтемы

В задании каждому студенту указывается спецтема – вопрос, требующий более глубокой самостоятельной проработки. Спецтема может входить в состав основных разделов проекта, но может касаться и других вопросов конструирования ЖРД. Ниже приведен список возможных спецтем.

В зависимости от сложности задания все спецтемы оценены соответствующей оценкой. Однако оценка при защите проекта зависит не только от сложности задания, но и от качества выполнения и защиты спецтемы.

### Перечень спецтем

1. Спецтемы, выполнение которых оценивается на отлично
  - 1.1. Расчет с помощью пакета ANSYS элементов смесительной головки (среднего или внутреннего днища, силовой форсунки).
  - 1.2. Расчет с помощью пакета ANSYS коллекторов.
  - 1.3. Расчет с помощью пакета ANSYS узлов крепления камеры.
  - 1.4. Определение с помощью 3D технологий массы элементов камеры и всей камеры.
  - 1.5. Выполнение рациональной компоновки двигателя в отсеке ракеты (заданы размеры цилиндрического отсека, ось отсека совпадает с осью камеры).
  - 1.6. Компоновка двигателя минимальных размеров (должен быть минималь-

ный объём цилиндра, описанного около двигателя).

1.7. Разработка оригинальных конструктивных решений, предложенных студентом.

2. Спецтемы, выполнение которых оценивается на хорошо

2.1. Конструктивная разработка охлаждаемых виброакустических перегородок в камере.

2.2. Конструктивная разработка акустических резонаторов для гашения колебаний газа в камере сгорания.

2.3. Конструкция крепления камеры, позволяющее регулировать положение камеры при сборке.

2.4. Конструкция крепления камеры в карданном подвесе.

2.5. Конструкция крепления камеры с помощью сферического шарнира.

2.6. Подвод компонентов к качающейся камере через цапфы крепления камеры.

2.7. Подвод компонентов к качающейся камере через сильфоны.

2.8. Проектирование и расчет неохлаждаемого (проточно) соплового насадка.

2.9. В двигателе без дожигания конструкция выброса генераторного газа в расширяющуюся часть сопла.

2.10. Разработка конструкции многократного зажигания электроискрового или химического.

3. Спецтемы, выполнение которых оценивается на удовлетворительно

3.1. Разработка ПГСх с многократным химическим зажиганием камеры и ЖГГ.

3.2. Разработка ПГСх с многократным электроискровым зажиганием

камеры и ЖГГ.

- 3.3. Сравнение ПГСх с наддувом баков от баллона со сжатым газом и от ЖГГ и выбор оптимального варианта.
- 3.4. Конструктивная разработка неохлаждаемых виброакустических перегородок в камере.
- 3.5. Расчет фланцевого соединения камеры с трубопроводом окислителя.
- 3.6. Выбор и обоснование применения уплотнений неподвижных соединений камеры.
- 3.7. Разработка конструкции пирозапала (пиросвечи) для зажигания камеры.
- 3.8. Разработка конструкции фланцевого соединения с уплотнением конусной прокладкой.
- 3.9. Разработка конструкции фланцевого соединения с уплотнением из прокладки с МР.
- 3.10.. Разработка конструкции фланцевого соединения с уплотнением из резиновой прокладки круглого сечения.

### 3. Требования к пояснительной записке и графической части проекта

#### 3.1. Пояснительная записка

Пояснительная записка должна содержать обоснования решений и расчеты, выполненные только самим студентом. С целью уменьшения объема допускается также ссылка на материалы, помещенные в записках, ранее выполненных по другим дисциплинам. При написании записки можно пользоваться работами [15, 16].

Основная часть записки должна иметь следующие разделы:

## Введение (требования к проектируемой ДУ)

- 1) Функциональное проектирование (принципиальная схема ДУ, циклограмма запуска-останова)
- 2) Компоновочная схема двигателя. Расчет проходных сечений патрубков, подводящих компоненты
- 3) Описание конструкции камеры (состав камеры, способы соединения её частей, крепление камеры, зажигание компонентов, назначение штуцеров и др.)
- 4) Результаты проектирования теплозащиты камеры
  - 4.1) Выбор системы теплозащиты элементов камеры и вида охладителя
  - 4.2) Расчет проточного охлаждения камеры, выполненный с помощью пакета ANSYS или традиционным способом с использованием программы OXLADA.
  - 4.3) Проектирование оребрения стенки камеры и расчет коэффициента эффективности оребрения в критическом сечении
  - 4.4) Расчет температуры стенки с учетом оребрения  
(Вывод о том, что температура стенки находится в пределах нормы, в противном случае – меры по снижению температуры, например, нанесением покрытия или др.)
- 5) Результаты расчетов на прочность в соответствии с разделом 2.3.  
Другие расчеты в соответствии с заданием (прочность коллекторов, фланцевых соединений, расчет устойчивости формы сопла)
- 6) Сводка материалов, применяемых для изготовления деталей камеры
- 7) Последовательность сборки камеры (технологическая часть)
- 8) Спецтема проекта  
Заключение (итоги проектирования и предложения)  
В заключении необходимо сравнить параметры разработанного ЖРД и уже выполненных двигателей [4] и сделать соответствующие выводы.

## Список использованных источников

Приложения:

1. Рабочий чертёж детали
2. Спецификация камеры
3. Сборочный чертёж камеры (прилагается к пояснительной записке)

### 3.2. Графическая часть проекта

Студент разрабатывает модель 3D камеры и сборочный чертеж – документ, на основании которого будет выполняться окончательная сборка камеры из сборочных единиц и деталей. Поэтому только эти элементы конструкции должны быть занесены в спецификацию, которая прилагается к пояснительной записке. В местах сварки этих элементов необходимо обозначить тип сварки и выполнить выносные разрезы, на которых показана разделка сварных швов и виды сечения до и после установки соединительных колец.

Для выяснения конструкции отдельных элементов (форсунок, штуцеров, патрубков, коллекторов и др.), а также способов их соединения с камерой необходимы дополнительные виды по стрелкам, выносные разрезы и сечения.

Объём модели и сборочного чертежа должен соответствовать 3...4 листам ватмана формата А1.

На чертеже должны быть:

- проставлены виды сварки согласно ГОСТ 2.312-68 и 2.313-68;
- проставлены посадочные, установочные, присоединительные, габаритные, исполнительные и справочные размеры, межосевые расстояния отверстий, типы и размеры резьб;
- вынесены номера позиций сборочных единиц и деталей;
- выполнены надписи: основная – по ГОСТ 2.104 – 68 и пояснительная -

по ГОСТ 2. 318 – 68.

Пояснительная надпись включает основные технические требования на заключительные операции сборки камеры (сварку головки и кронштейнов узлов крепления камеры с её корпусом), на окончательный контроль её качества, на подготовку её к транспортировке или хранению [3].

Однородные и близкие по своему характеру требования группируются по возможности вместе в следующей последовательности:

- требования к материалам, заготовкам, способам соединений, термообработке и т.д.;
- размеры, предельные отклонения размеров, формы и взаимного расположения поверхностей;
- требования к качеству поверхностей, указания об их отделке или покрытии;
- зазоры, расположение отдельных элементов конструкции;
- условия и методы испытаний;
- правила транспортировки и хранения.

Пункты, входящие в технические требования, должны иметь сквозную нумерацию сверху вниз и начинаться с новой строки. Текст размещается над основной надписью. При назначении технических требований студент должен обосновать их необходимость и знать способы их проверки.

#### 4. Порядок защиты проекта

До защиты проекта (минимум за день) консультант проверяет пояснительную записку и графическую часть проекта и подписывает их. Консультант может в пояснительной записке написать своё мнение о работе и рекомендовать оценку проекта.

Защита проекта происходит по расписанию. Если группу консультировало два преподавателя, то защиту принимает преподаватель, непосредственно не консультировавший данного студента. Если группу вёл один преподаватель, то защиту проекта он и принимает.

Студент представляет на защиту разработанные им материалы и в течении 5-6 минут докладывает о результатах проделанной работы, обращая основное внимание на вопросы, разработанные им самостоятельно.

После доклада студенту задают вопросы по всему комплексу работы над проектом. Оценка проставляется по четырёх бальной системе. При оценке проекта учитываются: содержание, объём и глубина проекта, сложность задания, степень самостоятельности конструктивной разработки, отсутствие конструкторских ошибок, качество доклада, правильность и полнота ответов на вопросы, оценка консультанта (если она есть).

Проект оценивается:

"Отлично",

если при разработке конструкции приведены оригинальные или самостоятельные решения; проект содержит грубых ошибок; спецтема проекта соответствует отличной оценки, доклад полный и короткий; ответы на вопрос полные и глубокие.

"Хорошо",

если разработка конструкции выполнена самостоятельно, спецтема соответствует оценке не ниже "хорошо", доклад и ответы на вопросы достаточно полные; проект содержит грубых ошибок.

"Удовлетворительно",

если при разработке конструкции в основном использована конструкция указанного преподавателем прототипа, которая студентом усвоена в

достаточной мере; спецтема проекта отвечает оценке "удовлетворительно", проект не содержит грубых ошибок; ответы на большинство вопросов правильны.

"Неудовлетворительно", - во всех остальных случаях.

Студенты, получившие неудовлетворительные оценки на защите, а также претендующие на более высокую оценку, допускаются к повторной защите с разрешения декана факультета.

### **Библиографический список**

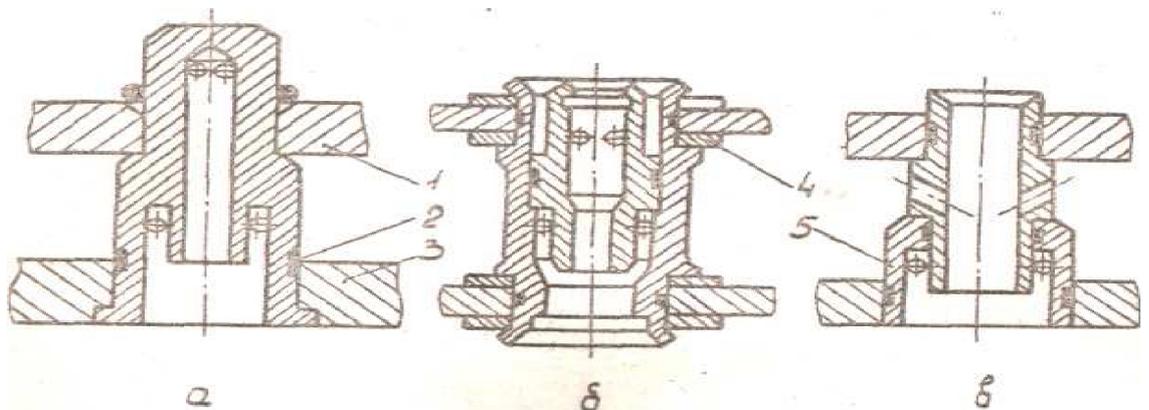
1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп./ Под ред. Д.А.Ягодникова.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 488 с.:ил.
2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки" / Г.Г. Гахун, В.И.Баулин, В.А.Володин и др.; Под общ. ред. Г.Г. Гахуна. -Машиностроение,1989. - 424с.
3. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие /Д.Ф. Пичугин, Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 244 с.
4. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие /Д.Ф. Пичугин; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев,1990. 244 с.
5. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями /В.Н.Челомей, Д.А.Полухин, Н.Н.Миркин и др.; Под ред. акад. В.Н.Челомея – Машиностроение, 1978. – 240с.
6. Борисов В.А. Основы конструирования ракетных двигателей: учеб. пособие / В.А. Борисов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,

2007. 98 с.: ил.

7. Козлов А.А. и др. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок: Учебник для студентов авиадвигательных и строительных специальностей вузов /А.А. Козлов, В.Н. Новиков, Е.В. Соловьев. М.: Машиностроение, 1988. 352 с.
8. 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. 129с.
9. Атлас конструкций ЖРД. Ч.1. Под ред. Г.Г. Гахуна. Изд. МАИ. М.,1969.
10. Атлас конструкций ЖРД (Описания). Ч.1. Под ред. Г.Г. Гахуна. Изд. МАИ. М.,1969.
11. Выбор материалов для деталей ДЛА: Метод. указания к курс. и дипл. проектированию (с приложением) /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1984.
12. Орлов П.И. Основы конструирования. Кн.2. М., «Машиностроение», 1972, 525с.
13. Сборник нормативно технических и руководящих документов: Ч. 3. Требования по стандартизации при проведении учебного процесса /Отв. за выпуск А. А. Ткаченко;Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 68 с.
14. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. 5-е изд. М.: Наука,1970. 544 с.
15. Конструирование ТНА и элементов камеры ЖРД с использованием 3D моделей: учеб. пособие/К65 [А.И. Белоусов и др.] – Самара: Изд-во Самар.гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 132 с.: ил.

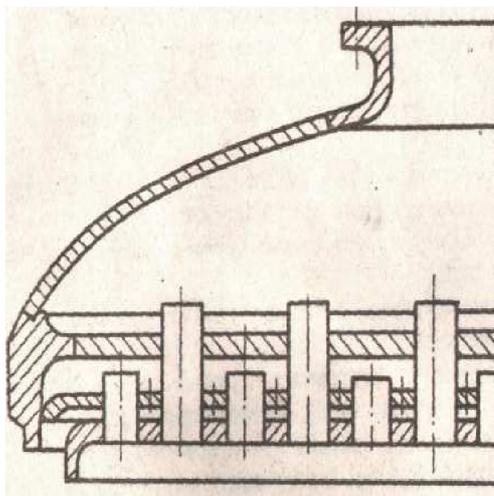
База конструктивных решений элементов камеры ЖРД

1. Элементы смесительной головки

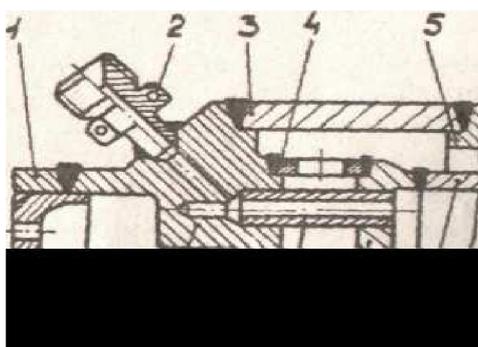


Элемент 1.1. Конструкция соединения форсунок с днищами головок при достаточной (а, в) и недостаточной для пайки толщине днищ (б):

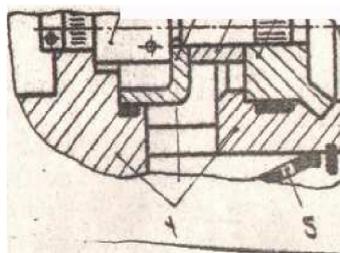
1 - среднее днище, 2 - колечко припоя, 3 - внутреннее днище, 4 - прокладки из более мягкого металла, 5- малорасходная форсунка



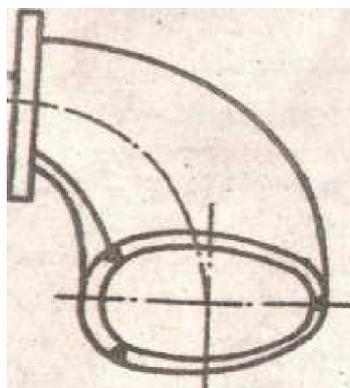
Элемент 1.2. Смесительная головка с дефлектором,  
приваренным к корпусу головки



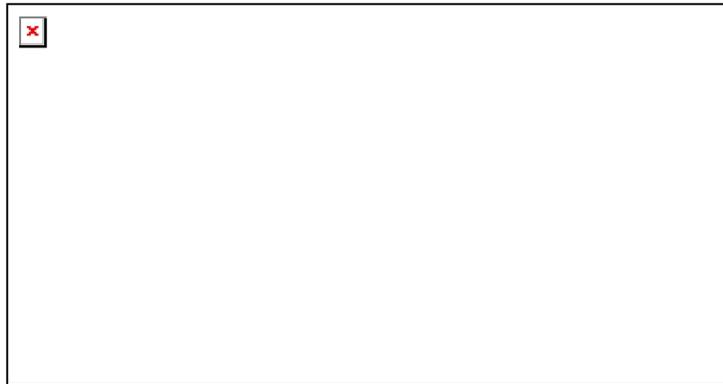
Элемент 1.3. Возможная конструкция соединения головки с корпусом  
камеры: 1 - газовод, 2 - штуцер для измерения давления газа в камере, 3 -  
соединительное кольцо. 4 - кольцо с радиальными отверстиями, 5 - рубашка  
корпуса камеры, 6 - стенка корпуса, 7 - внутреннее днище головки, 8 -  
втулка, 9 - среднее днище, 10 - корпус головки, 11 - газораспределительная  
решетка



Элемент 1.4. Крепление дефлектора к среднему днищу пайкой:  
1 – корпус головки, к которому пайкой и развальцовкой присоединено  
внутреннее днище и припаян дефлектор; 2 – фильтр



Элемент 1.5. Схема сварного газоведа: видны сварные швы,  
соединяющие три штампованные секции



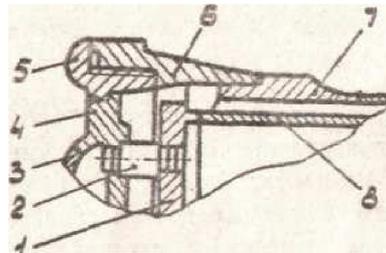
### Элемент 1.6. Конструкция мест установки пирозапалов:

а – на кольце, соединяющем смесительную головку с корпусом;

б – на корпусе смесительной головки;

1 – стенка корпуса камеры, 2 – внутреннее днище, 3 – форсунка, 4 – среднее днище, 5 – наружное днище, 6 – корпус головки, 7 – соединительное кольцо, 8 – штуцер для установки пирозапала, 9 – переходная втулка, 10 – корпус камеры, 11 – корпус пирозапала

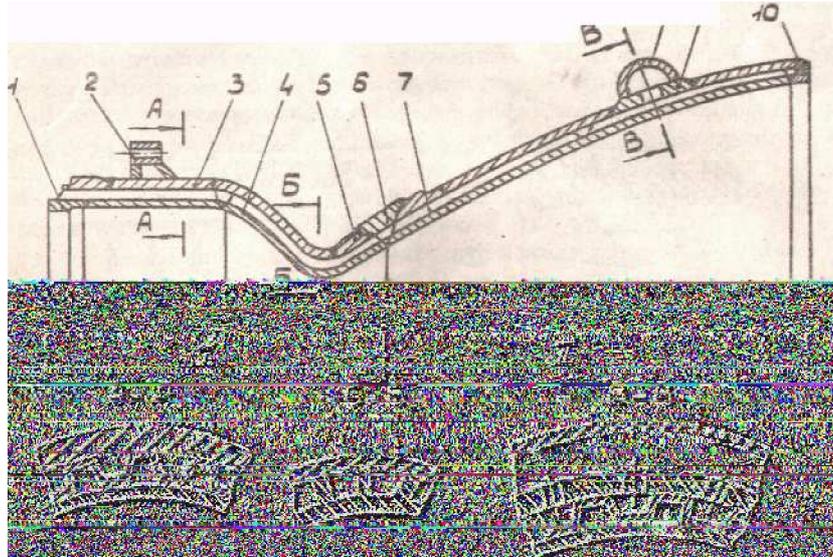
## 2. Конструктивные элементы корпуса камеры



### Элемент 2.1. Соединение титанового корпуса со стальной головкой с помощью резьбы и пайки:

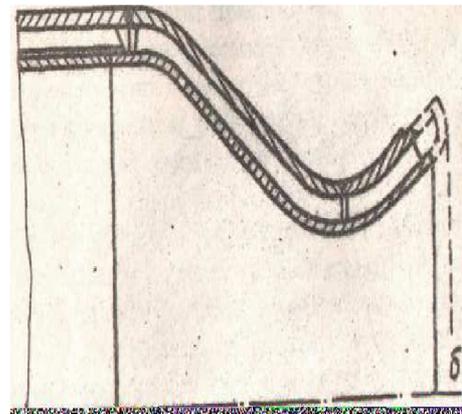
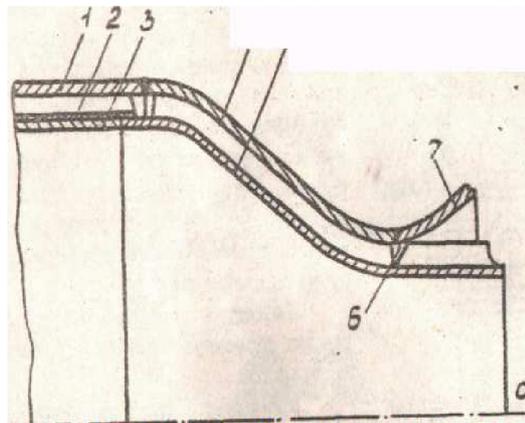
1 – внутреннее днище, 2 – форсунка, 3 – наружное днище головки,

4 – корпус головки со средним днищем, 5 – стальное переходное кольцо головки, 6 – титановое переходное кольцо рубашки корпуса, 8 – стенка

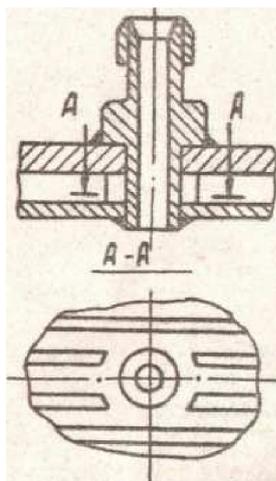


Элемент 2.2. Схема корпуса паяно-сварной камеры:

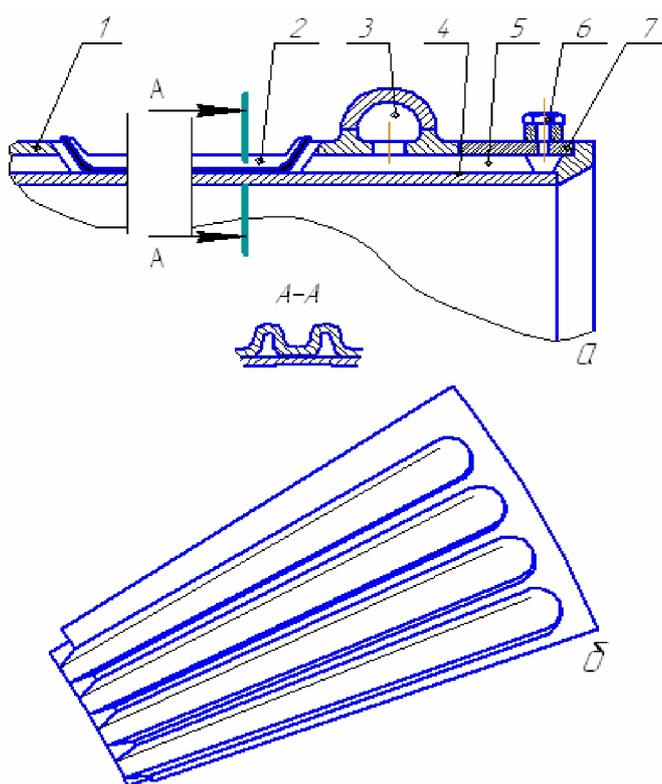
- 1 - утолщенное кольцо стенки, 2 - узел крепления камеры к раме ЛА,  
 3 - рубашка, 4 - стенка, 5 - переходное кольцо, 6 - соединительное кольцо,  
 7 - гофрированная проставка, 8 - обечайка коллектора, 9 –распреде-  
 лительное кольцо, 10 - замыкающее кольцо.



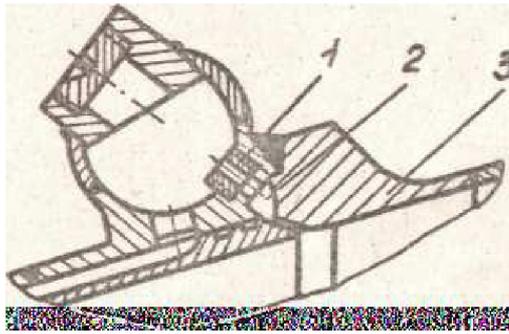
- Элемент 2.3. Смещение разъёма между средней частью и соплом за критику: 1, 2, 3- рубашка, гофрированная проставка и стенка цилиндрического участка корпуса, 4, 5 - рубашка и стенка входной части сопла, 6 - кольцевая проточка в ребрах, 7 - рубашка начального участка расширяющейся части сопла



Элемент 2.4. Установка штуцера измерения давления газа в камере сгорания на цилиндрическом участке корпуса

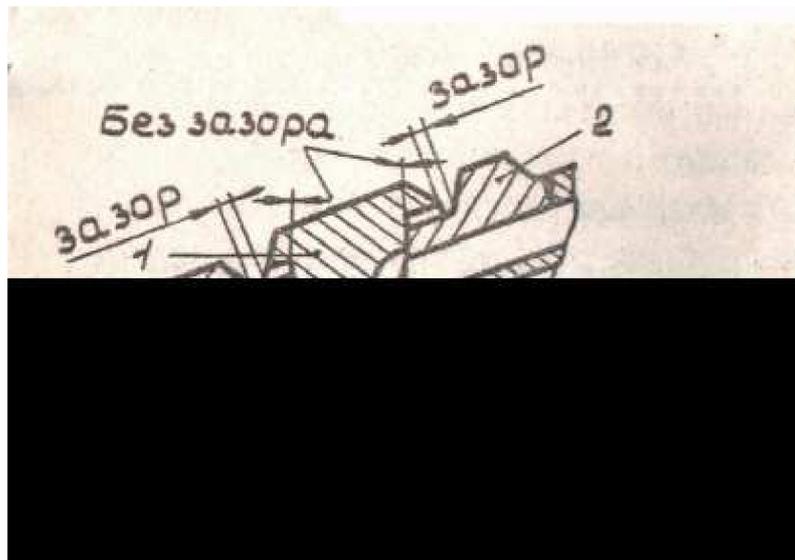


Элемент 2.4. Конструкция соединения рубашки корпуса 1 с гофрированной рубашкой 2: 1- рубашка корпуса, 2-гофрированная рубашка, 3-коллектор, 4-стенка, 5-гофрированная проставка, 6- пробка штуцера, 7- замыкающее кольцо

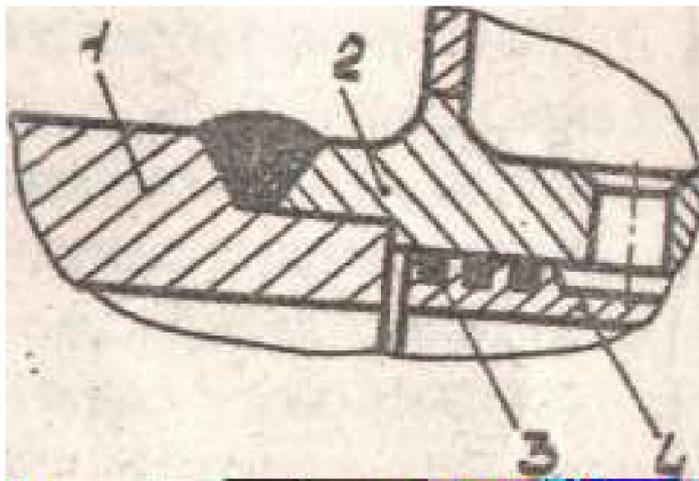


Элемент 2.5. Пояс завесы на стыке охлаждаемой регенеративно и  
одностенной частью сопла:

- 1- жиклёр для заданного расхода охладителя на завесу; 2- коллектор завесы;  
3- переходное кольцо одностенного насадка



Элемент 2.6. Установка соединительного кольца при сварке секций  
рубашки корпуса камеры (а) и схема установки подкладки при сварке  
разъемов этого кольца (б): 1- разъёмное соединительное кольцо; 2-  
переходное кольцо рубашки; 3- подкладка



Элемент 2.7. Соединение головки с корпусом камеры при установке коллектора для вывода охладителя: 1 - корпус головки, 2 - корпус коллектора, 3 - припой, 4 – стенка корпуса.

*СХЕМЫ ИЗЛОЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ РАЗДЕЛОВ*

*ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ*

Ниже приводятся рекомендуемые схемы изложения некоторых разделов пояснительной записки курсового проекта по дисциплине "Конструирование основных узлов и систем ДУ". Студентам предлагается при необходимости отдельные пункты изложения развернуть, другие сократить или исключить, однако все поставленные вопросы должны быть освещены.

*Схемы изложения*

**1. Реферат**

Курсовой проект по дисциплине "Конструирование основных узлов и систем ДУ" специальности 160700.68.

Пояснительная записка:..... стр., ..... рис., ..... табл., спецификация, ..... источников.

Графическая часть: сборочный чертёж камеры двигателя.

*Компоновка, пневмогидросхема, циклограмма, камера, смесительная головка, корпус камеры, расчёты теплозащиты, прочности элементов.*

На основании данных работы [\*] продолжено проектирование двигательной установки (ДУ): разработаны пневмогидравлическая система и её схема, циклограмма запуска и останова ДУ, функциональные схемы управления и регулирования ДУ, компоновка двигателя, конструкция камеры, выполнен сборочный чертёж камеры, произведены расчёты теплозащиты элементов камеры и их прочностной расчёт, рассмотрены вопросы изготовления деталей и сборки камеры.

\* Ссылка на курсовую работу по кафедре ТДЛА.

## 2. Введение

Техническое задание на проектирование ДУ включало в себя следующие исходные данные:

Назначение ДУ.....

Тяга и пределы её изменения,  $K_n$ .....

Удельный импульс,  $N$  с/кг .....

Компоненты топлива.....

Среднее массовое соотношение компонентов топлива и пределы его изменения.....

Время работы ДУ при одном включении, с.....

Число включений в полёте.....

Число полётов ЛА с данной ДУ.....

Участие ДУ в системе управления ракетой.....

Основными требованиями при проектировании заданной ДУ является:

в зависимости от назначения – .....

в зависимости от вида применяемого топлива - .....

Результаты теоретического проектирования изложены в работе [\*], где приведены сведения по анализу технического задания и выбору недостающих данных, термогазодинамический расчёт ДУ, расчёт размеров камеры и профилирование сопла, расчёт смесеобразования. Результаты дальнейшего проектирования изложены в данной пояснительной записке.

### 3. Описание двигательной установки

#### (функциональное проектирование)

Пневмогидравлическая схема двигательной установки (ДУ) показана на рис. ... , а перечень её агрегатов – в табл. 1.

В ДУ использован ЖРД ... (однокамерный или многокамерный, с дожиганием, без дожигания генераторного газа).

Предстартовый наддув баков осуществляется ... . На основном режиме работы наддув баков обеспечивается .....

Продувка магистрали (горючего, окислителя) производится .....

Захолаживание насоса (насосов) происходит..... (если она необходима)..

Для зажигания топливной смеси в камере двигателя и в жидкостном газогенераторе использована система с ... (тип воспламенителя).

Управление вектором тяги двигателя по тангажу, рысканию и крену обеспечивается... (если ДУ участвует в управлении вектором тяги).

Циклограммы запуска и останова ДУ показаны на рис....., а функциональные схемы управления и регулирования – на рис.....

### 3. Описание конструкции камеры двигателя

Спецификация камеры приведена в приложении ... , её сборочный чертёж – в приложении ... .

Камера двигателя изготовлена паяно-сварной и состоит из следующих сборочных единиц (СЕ): .....

Смесительная головка (приложение ... , поз. ...) имеет (описание составных частей головки, включая и все детали, расположенные на ней – штуцеры для замера, воспламенитель, коллектор, фланец, узлы крепления и т.д.).

Корпус камеры (приложение ... , поз. ...) разделен на две (три) сборочные единицы: ... (наименование единиц и их позиции).

Средняя часть камеры двустенная и состоит из следующих сборочных единиц – ..... (описание формы, конструкции сборочных единиц, из которых состоит средняя часть, и расположенных на ней деталей и узлов).

Сопловая часть камеры ..... .

Сопловой насадок ..... .

Материалы, применяемые для изготовления деталей камеры, приведены в таблице..

Наименование детали	Марка материала
Стенка камеры, внутреннее днище, форсунки	БрХ08
Корпус ...	...

#### 4. Последовательность сборки камеры

Вначале производится изготовление деталей и сборка основных сборочных единиц (СЕ): смесительной головки и корпуса камеры.

(Далее приводится состав, особенности изготовления и последовательность сборки основных СЕ ).

При сборке камеры основные СЕ последовательно соединяются сваркой кольцевыми швами. Технология выполнения этих кольцевых швов следующая: производится центровка свариваемых СЕ и совмещение кромок стыкуемых стенок (на приспособлении). Делается сварка встык стенок соединяемых СЕ. При этом электрод подводится к шву через кольцевой зазор между соединяемыми рубашками. После этого торцы переходных колец рубашки обрабатываются в соответствии с чертежом (см. сборочный чертёж, виды ...). Устанавливаются соединительные полукольца и производится их сварка с переходными кольцами.

В разработанной камере таким образом соединяются вначале сопловая и средняя часть, а затем к полученному корпусу присоединяется головка.

Далее описывается последовательность установки остальных элементов камеры, приведённых на сборочном чертеже, (например – опор, соплового насадка).

В описании последовательности сборки камеры следует указать:

1) между какими операциями на внутреннюю поверхность стенки наносится теплоизоляционное покрытие (если оно имеется);

2) когда привариваются опоры и когда окончательно обрабатываются их установочные поверхности.

Заканчивается описание сборки описанием контрольных технологических испытаний (гидроопрессовки, пневмоиспытаний и проливки).

## 5. Заключение

В данной записке изложены результаты работы, выполненной при проектировании заданной ДУ. Функциональное проектирование включало разработку ПГС ЖРД с рассмотрением последовательности запуска и оста-

новки двигателя, выбор функциональных схем управления и регулирования ЖРД и разработку схемы его компоновки.

Был разработан сборочный чертёж камеры, рабочий чертёж детали (форсунки), составлено описание конструкции камеры и рассмотрены вопросы изготовления деталей и сборки камеры. Работоспособность разработанной конструкции подтверждается проведёнными расчетами теплозащиты и прочности элементов камеры.

В отличие от аналогичных ЖРД (например, ...аналог можно выбрать в [4] ) в спроектированном двигателе применены ... (указать отличия), что обеспечивает ...

Удельный импульс спроектированного ЖРД  $J_y = \dots$  . (Необходимо сравнить это значение с характеристиками аналогичных двигателей и объяснить, чем это может быть вызвано).

