

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА"

В.А. БОРИСОВ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.455 (075)

ББК 39.65

Б 825

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. В.С. Егорычев;

Генеральный конструктор ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова,

канд. техн. наук Д. Г. Федорченко;

начальник отдела криогенной техники АД и РД

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, заслуженный

конструктор России А. И. Иванов

Борисов В.А.

Б 825 **Основы конструирования ракетных двигателей:** учеб. пособие / В.А. Борисов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 98 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0547-9

Приведены методические материалы по дисциплине "Основы конструирования ракетных двигателей", связанные с конструированием камеры ракетного двигателя и разработкой его пневмогидравлической схемы. Некоторые из приводимых расчетных методик разработаны в СГАУ на кафедре КиПДЛА, материалы по другим вопросам отсутствуют или недостаточно освещены в учебной литературе. Учебное пособие может использоваться как при изучении курса, так и при выполнении курсовых и дипломных проектов по специальности 160302.

Предназначено для студентов аэрокосмического университета, обучающихся по специальности 160302 (ракетные двигатели). Разработано на кафедре КиПДЛА.

ISBN 978-5-7883-0547-9

© Борисов В.А., 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общие вопросы проектирования.....	5
1.1. Техническое задание.....	5
1.2. Стадии проектирования при разработке ЖРД.....	6
2. Функциональное проектирование двигательной установки... ..	8
2.1. Проектирование пневмогидравлической системы ДУ.....	8
2.2. Разработка компоновочной схемы двигателя.....	16
3. Проектирование камеры двигателя.....	18
3.1. Проектирование системы теплозащиты элементов камер- ры двигателя.....	18
3.1.1. Расчет регенеративного охлаждения камеры.....	18
3.1.2. Проектирование оребрения охлаждающего тракта корпуса камеры.....	24
3.1.3. Расчет температуры стенки с учётом оребрения... ..	29
3.1.4. Применение спирального оребрения.....	32
3.1.5. Использование теплоизолирующего покрытия.....	33
3.1.6. Использование завесного охлаждения.....	35
3.2. Конструирование камеры двигателя.....	37
3.2.1. Конструирование смесительной головки.....	38
3.2.2. Конструирование корпуса камеры.....	45
3.2.3. Сборка камеры.....	52
3.3. Расчет прочности элементов камеры.....	55
3.3.1. Расчет общей прочности корпуса.....	56
3.3.2. Расчет местной прочности.....	63
4. Требования к курсовому проекту.....	69
Заключение.....	72
Библиографический список.....	75
Приложения.....	77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы проектирования ракетного двигателя. Большая часть пособия посвящена разработке конструкции основного агрегата ЖРД – камеры двигателя, чрезвычайно напряжённого устройства, в котором рабочие процессы протекают при давлениях до 30 МПа и температуре 3000 - 4000К. Кажется невероятным, что камера выполнена из обычных конструкционных материалов, но это так. Достигается удивительная работоспособность камеры благодаря остроумным конструкторским решениям, многие из которых найдены отечественными инженерами.

Изучение конструирования наиболее эффективно при сочетании теоретического курса с практическими работами по разработке элементов конструкции ЖРД. Основная часть этих работ проводится при выполнении курсового проекта по дисциплине "Основы конструирования ракетных двигателей".

Цель курсового проектирования – углубление и обобщение знаний, получаемых студентом на лекциях и лабораторно-практических занятиях, и применение этих знаний к комплексному решению конкретной инженерной задачи.

Во время выполнения курсового проекта студент должен решать следующие задачи:

- практически осваивать методы проектирования и конструирования двигателей и методики проведения различных расчетов;
- учиться пользоваться справочной литературой, научно-технической документацией и правилами оформления проектных документов;
- вырабатывать навыки самостоятельной работы.

Проект по дисциплине "Основы конструирования ракетных двигателей" является продолжением курсовых работ по дисциплинам "Теория ракетных двигателей", "Теория и расчет лопаточных машин" и курсового проекта "Динамика и прочность ДЛА".

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖРД

1.1. Техническое задание

Основанием для выполнения проектирования ЖРД является документ, называемый техническим заданием (ТЗ), который разрабатывается совместно предприятием-заказчиком и предприятием-исполнителем и утверждается на уровне ведомственного министерства. ТЗ устанавливает назначение двигателя, технические характеристики, а также требования, предъявляемые к двигателю. Обычно задаются:

- компоненты топлива и требования к их чистоте;
- тяга;
- удельный импульс;
- время работы (ресурс);
- циклограмма работы двигателя;
- наддув баков;
- управление вектором тяги;
- количество включений;
- требования к САЗ (системе аварийной защиты);
- требования к КТС (контролю технического состояния);
- габариты двигателя;
- масса двигателя (сухого и залитого топливом);
- требования к надёжности двигателя;
- требования к вибропрочности;
- время общей разработки двигателя.

Задание на разработку двигателя в курсовом проекте по дисциплине "Основы конструирования ракетных двигателей" включает только часть этих данных. Причем большая часть исходных данных

берётся из курсовой работы по дисциплине "Теория ракетных двигателей", которая предшествует рассматриваемому проекту. Из пояснительной записки к этой работе (в дальнейшем "Пояс. зап. по ТРД") для выполнения проекта необходимо взять 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.

Из курсового проекта "Динамика и прочность ДЛА" берутся структурная схема ТНА, а также его габариты.

1.2. Стадии проектирования при разработке ЖРД

Проектные работы при разработке ЖРД относятся к разряду опытно-конструкторских работ (ОКР). В соответствии с ОСТ 1392-8717-75 для ОКР установлена следующая классификация стадий разработки:

- тактико-техническое задание;
- техническое предложение;

- эскизный проект;
- разработка технической документации на опытное изделие;
- изготовление опытных изделий, наземные автономные испытания и корректировка рабочей документации;
- наземные комплексные и межведомственные испытания;
- лётные испытания;
- подготовка документации на изделия серийного производства.

По объёму выполняемых работ курсовой проект "Основы конструирования ракетных двигателей" ближе всего к стадии эскизного проектирования.

В соответствии со стандартом эскизный проект должен включать разработку пневмогидравлической схемы (ПГС) с описанием её работы, чертежи основных агрегатов, сборочный чертёж двигателя, пояснительную записку с необходимыми расчетами и некоторые другие документы.

Поэтому рассматриваемый курсовой проект включает разработку ПГС двигателя, его компоновочной схемы, разработку сборочного чертежа камеры, рабочего чертежа детали и пояснительной записки с описанием работы и необходимыми расчетами.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Прежде всего производится функциональное проектирование ДУ. На основании данных в "Пояс. зап. по ТРД" и сформулированных требований выбирается конструктивная схема двигательной установки, которая может представлять собой одно- или многокамерный двигатель или же связку одно- или многокамерных двигателей [3]. Если эта схема была уже выбрана при выполнении курсовой работы по кафедре ТДИА, то студент должен согласовать её с консультантом проекта. Желательно также выбрать прототип проектируемого двигателя.

2.1. Проектирование пневмогидравлической системы ДУ

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).

Электрическая схема ДУ рассмотрена в пособии [5]. В курсовом проекте её не разрабатывают.

При разработке ПГСх исходят из структурной схемы ЖРД, выбранной для проектируемого двигателя в "Пояс. зап. по ТРД", 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 останова 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] 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 ЖГТ.

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 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 последствия тяги.

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

В качестве примера оформления ПГСх на рис.1 приведена схема ДУ с системой НПТ без дожигания, работающей на топливе $O_{2ж} + RP-1$ (синтетический керосин) [4]. Эта схема ЖРД первой ступени ракеты-носителя «Сатурн 1В».

К схеме прилагается перечень агрегатов (табл. 1).

На ПГСх состояние агрегатов изображают в момент времени, предшествующий предпусковой подготовке. Включение агрегатов и характер их срабатывания (например, открытие и закрытие клапанов, перестройка регуляторов и т. п.) указывают в описании работы ПГС на циклограмме ее работы.

Циклограмма представляет собой график, по оси абсцисс которого откладывают интервалы времени с момента начала запуска или останова до момента срабатывания того или иного агрегата автоматики, а по оси ординат – изменение давления газа в камере или тягу двигателя [1]. Время, затрачиваемое на выполнение одной операции, равно времени срабатывания агрегата, обеспечивающего ее выполнение (например, клапана), и времени, необходимого для заполнения следующей за клапаном полости.

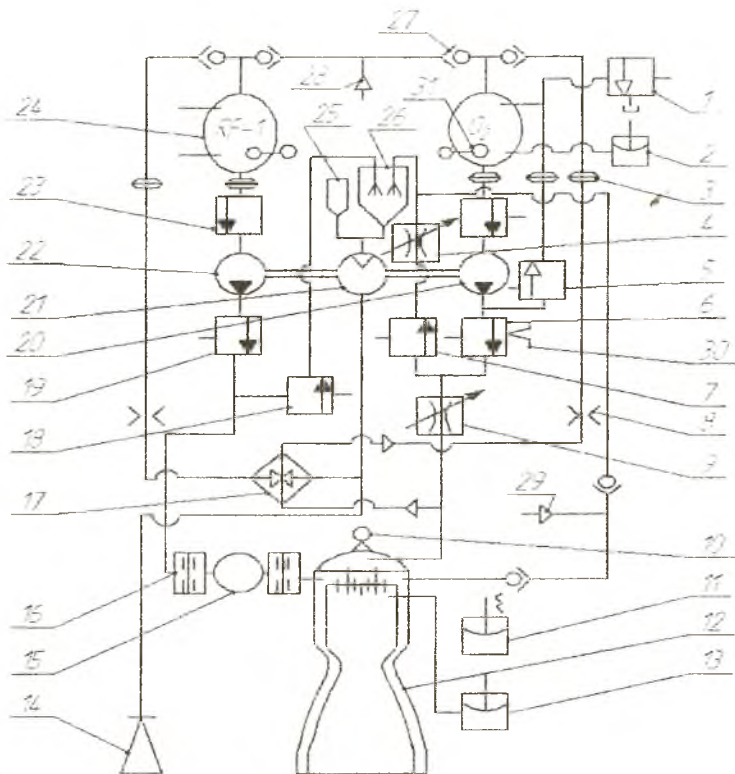


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема ДУ

Так, например, время срабатывания клапанов с приводом:
 пиротехническим составляет 0,015...0,02 с;
 электрическим – 0,03...0,05 с;
 пневматическим – 0,10...0,20 с.

Меньшее время срабатывания имеют клапаны с небольшим расходом газа и с малым перепадом давления на запорном органе.

Время заполнения полости магистрали до следующего агрегата определяют по скорости течения жидкости или газа.

Иногда для контроля протекания или завершения операции устанавливают сигнализаторы различных параметров рабочего процесса (давления, температуры, воспламенения топлива, наличия жидкости и др.).

Перечень агрегатов к схеме ПГСх

Номер агрегата	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество
1	Дренажный клапан	Пневмогидравлический	2
2	Реле давления баков	Мембранное	2
3	Сильфон	-	5
4	Регулятор системы РКС	Электромеханический	1
5	Циркуляционный клапан	Пневмогидравлический	1
6	Главный клапан O ₂	Пневмогидравлический	1
7	Клапан O ₂ ЖГГ	Пневмогидравлический	1
8	Дроссельная шайба	-	2
9	Дроссель системы СОБ	Электромеханический	1
10	Узел крепления камеры	Шарнирный	1
11	Датчик давления газа в камере	Потенциометрический	1
12	Камера двигателя	-	1
13	Реле давления камеры	Мембранное	1
14	Утилизационное сопло	-	2
15	Баллон с триэтилалюминием	-	1
16	Мембрана свободного прорыва	-	2
17	Испаритель	-	1
18	Клапан RP-I ЖГГ	Пневмогидравлический	1
19	Главный клапан RP-I	Пневмогидравлический	1
20	Насос O ₂	Центробежный	1
21	Турбина ТНА	Активная	1
22	Насос RP-I	Центробежный	1
23	Клапан разделительный	Пневмогидравлический	2
24	Бак	-	2
25	Пиростартер	-	1
26	Жидкостный газогенератор	Восстановительный	1
27	Обратный клапан		6
28	Подвод гелия от наземной системы для надува баков	-	1
29	Подвод гелия от наземной системы для продувки магистрали O ₂ ЖГГ и RP-I камеры	-	1

Время протекания запуска, которое обычно отсчитывают с момента начала расхода топлива через двигатель, составляет 0,8...5,0 с, причем наименьшее время затрачивается на непрограммированный, а наибольшее – на программированный запуск с несколькими промежуточными режимами.

Циклограмма работы ДУ, изображенной на рис. 1, показана на рис. 2. Знаком “плюс” обозначают включение агрегата в работу, знаком “минус” – его выключение. Под осью абсцисс проставляют номера позиций агрегатов, указанные на ПГСх.

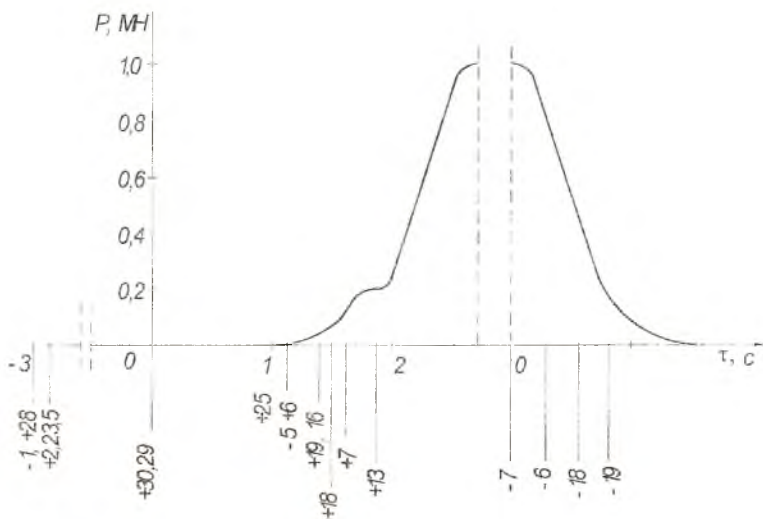


Рис. 2. Циклограмма работы ДУ

Время срабатывания агрегатов при запуске откладывают вправо от нуля, который соответствует моменту начала расхода рабочих веществ (например, компонентов топлива) из ДУ. Влево от нуля отмечают время протекания предпусковых операций.

Рассмотрим порядок срабатывания агрегатов ДУ, схема которой показана на рис.1. За три секунды до команды “Пуск” начинают предпусковую подготовку ДУ. При этом закрывают дренажные клапаны 1 и по трубопроводу 28 через обратные клапаны 27 подают в баки гелий от наземной системы. С повышением давления в баках до

расчетного, что фиксирует реле давления 2, открываются входные клапаны 23, клапан циркуляции 5 и начинается заливка насосов компонентами топлива до главных клапанов 6 и 19. Одновременно пары кислорода, образующиеся в насосе, через циркуляционный клапан и трубопровод поступают обратно в бак, где происходит их конденсация. Таким образом осуществляют захолаживание насоса O_2 .

При расчетном показании термомпары 30 на выходе из насоса начинается запуск. С этого момента, обозначенного нулем на циклограмме, отсчитывают время срабатывания агрегатов автоматики, обеспечивающей запуск ДУ.

Вначале через трубопровод 29 от наземной системы подается гелий на продувку полости RP-1 головки камеры и полости O_2 головки ЖГГ.

Через 1с после включения продувки подается команда на воспламенитель пиростартера 25, и турбина 21 начинает раскрутку насосов 20 и 22. Спустя 0,2с закрывается клапан циркуляции 5, открывается главный клапан 6, окислитель поступает в камеру 12 и вместе с продувочным гелием истекает из сопла. В то же время гелий препятствует попаданию паров O_2 в полость горячего головки.

Еще через 0,2с открывается клапан 19 и под давлением основного горючего прорываются мембраны 16. Триэтилалюминий $(C_2H_5)_3Al$ из баллона 15 поступает через головку в огневую полость камеры и воспламеняется в кислороде.

Продувка гелием прекращается обратным клапаном в момент, когда давление горючего станет равным давлению продувки.

С запаздыванием в 0,1с открывается сначала клапан 18 горючего, а затем – клапан окислителя 7 ЖГГ 26 с тем, чтобы в ЖГГ образовалась топливная смесь восстановительного состава. В противном случае газы пиростартера, имеющие восстановительный состав, будут дожигаться в кислороде, что привело бы к возрастанию температуры газа перед турбиной выше расчетной. Воспламенение смеси в ЖГГ происходит от горячих газов пиростартера.

Некоторое время турбина работает на смеси газов, а после выгорания твердого топлива пиростартера переходит целиком на питание от ЖГГ. Двигатель выходит на предварительный режим работы с тягой, которая определяется расходом O_2 через регулятор 4 и со-

ставляет примерно 20% от номинальной величины. По истечении 1,8с от начала запуска и при срабатывании реле давления 13 поступает команда на увеличение проходного сечения регулятора 4. Запуск заканчивается через 2,2с после подачи команды на продувку с выходом двигателя на режим номинальной тяги. В этот момент регулятор 4 подключается к системе регулирования кажущейся скорости, а регулятор 9 – к системе одновременного опорожнения баков.

Наддув баков на основном режиме работы производится следующим образом: бак горючего надувается генераторным газом, охлажденным в испарителе 17, а бак окислителя – парами кислорода, образующимися в испарителе под действием тепла, отдаваемого генераторным газом.

Ступенчатый запуск ДУ объясняется тем, что на первой ступени ракеты-носителя установлено 8 автономных двигателей.

На основном режиме работы ДУ обеспечивает получение конечных параметров ступени V_k и m_k , являясь исполнительным органом систем РКС и системы управления вектором тяги [5]. Для иллюстрации работы этих систем и системы регулирования тяги необходимо составить их функциональные схемы (приложение 1).

Все системы ДУ работают в автоматическом режиме. Каждая из систем должна иметь в своем составе три элемента: *датчик*, измеряющий данную величину, *счетно-решающее устройство* (блок бортовой ЭВМ), в котором по сигналу датчика вычисляется замеренная величина, сравнивается с ее программным значением и при большом их расхождении вырабатывается команда, идущая на *исполнительный орган*.

Для управления вектором тяги в ДУ без дожигания на высотных двигателях часто используют системы с рулевыми утилизационными соплами, а в ДУ с дожиганием – поворотные двигатели или камеры [1]. В ДУ больших тяг для управления вектором тяги часто применяют специальные рулевые двигатели или камеры.

Останов ДУ осуществляется после срабатывания одного из датчиков, установленных на выходе из баков и регистрирующих окончание компонента топлива. По его сигналу подается команда на закрытие клапана 7, в результате чего прекращается горение в ЖГГ и обороты ТНА снижаются. С интервалами в 0,2с закрываются по-

следовательно клапаны 6, 8 и 19, и через 1с тяга ДУ снижается до нуля. Такая последовательность останова предусматривает уменьшение гидроударов в магистралях подачи компонентов при закрытии главных клапанов и снижении температуры нагретых деталей двигателя.

2.2. Разработка компоновочной схемы двигателя

После разработки ПГСх необходимо выбрать и нарисовать 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. При этом могут использоваться упрощённые модели внешнего вида агрегатов, показанные в приложении 2. Все они представляют собой тела вращения.

Рекомендуется компоновочную схему выполнять в масштабе 1:8 или 1:10 на листе формата А3 или А4. Основные размеры камеры (d_3 и L_1) в компоновке можно принять равными размерам газодинамического тракта камеры, взятыми из "Пояс. зап. по ТРД". 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 $w = 10 \dots 20$ м/с, а для жидкого водорода $w = 20 \dots 30$ м/с;

ρ – 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 в зависимости от размеров камеры в соответствии с рекомендациями

приложения 2. Размеры клапанов, показанных там же, целесообразно назначать исходя из размеров трубопроводов.

На компоновочной схеме должно быть минимум два вида на двигатель, расположенных в проекционной связи (вид сбоку и вид сверху).

Приветствуется выполнение компоновки в графическом редакторе 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:

В усложнённом варианте проекта трубопроводы должны располагаться с допустимыми зазорами относительно друг друга и остальных агрегатов, радиусы изгиба их должны быть также ограничены. При этом могут быть поставлены задачи:

1) Уместить двигатель в цилиндрическом отсеке заданных размеров (ось цилиндра совпадает с осью камеры).

2) Создать двигатель минимальных размеров (должен быть минимальный объём цилиндра, описанного около двигателя).

3) Создать двигатель минимальных поперечных размеров, например, не выходящих за пределы среза сопла.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Порядок проектирования камеры изложен в пособиях [1,3]. Часть вопросов по её проектированию (расчет процессов в камере, выбор формы и размеров основных её элементов) решены при изучении дисциплины "Теория ракетных двигателей" (см. "Пояс. зап. по ТРД"). При выполнении курсового проекта необходимо спроектировать систему теплозащиты камеры, разработать её конструкцию и рассчитать на прочность основные её элементы.

3.1. Проектирование системы теплозащиты элементов камеры двигателя

В уже выполненной работе "Пояс. зап. по ТРД" 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 оребрение охлаждающего тракта и, если имеется необходимость, предложить другие мероприятия теплозащиты.

3.1.1. Расчет регенеративного охлаждения камеры

Расчет регенеративного охлаждения камеры производится на ЭВМ по программе OXLADA, разработанной на кафедре КиПДЛА. Для упрощения принята расчетная схема теплообменника с противотоком, в которой ввод охладителя в охлаждающий тракт предусмотрен у среза сопла, а сам охлаждающий тракт является щелевым.

Исходные данные, необходимые для расчета, включают в себя геометрические размеры газодинамического тракта камеры, параметры газа на входе в сопло, параметры и теплофизические свойства

охладителей, свойства материала стенки, её толщину и допустимые температуры системы регенеративного охлаждения.

Прежде всего, необходимо выбрать материал стенки камеры и его толщину (они предполагаются постоянными по всей длине камеры), а также предельно допустимую скорость течения охладителя в охлаждающем тракте.

Материал стенки должен обладать высокой теплопроводностью. Поэтому, если допускают условия работы камеры, стенку изготавливают из медных сплавов, чаще всего из бронзы БрХ08. При использовании агрессивных охладителей стенка выполняется из нержавеющей стали типа Х18Н10Т. Если стена охлаждается горючим, допускающим применение медных сплавов, а агрессивный окислитель поступает через смесительную головку, стенка корпуса может быть выполнена из медного сплава. Однако в этом случае, при необходимости длительного хранения ЛА в заправленном топливом состоянии, стенку необходимо делать из нержавеющей стали. Следует помнить, что при изготовлении стенки из нержавеющей стали в пристеночном слое газа должна быть более низкая температура, чем при использовании медных сплавов.

Толщину стенки в предварительном расчете принимают равной 1...1.5мм.

Предельную скорость течения охладителя в охлаждающем тракте в критическом сечении для жидкостей можно принять равной 60...80м/с, для газообразного водорода – 200- 250м/с.

Для проведения расчета необходимы следующие данные:

Геометрические размеры контура газового тракта, полученные в "Пояс. зап. по ТРД". По этим данным в ЭВМ по уравнениям, описывающим отдельные участки контура, будет построен полный контур газового тракта.

Размеры, необходимые в расчете, показаны на рис.3. Это продольные размеры Х2, ..., Х6, отсчитываемые от среза сопла (места ввода охладителя). Поперечные размеры Y0, Y2, Y3 отсчитывают от оси сопла (это радиусы камеры на срезе сопла, в критике и в цилиндрической части). Радиусы скругления профиля сопла R1, R2 и R3 имеют центры, ординаты которых вычисляются в процессе выполнения программы, также вычисляется точка профиля сопла с коор-

динатами X_1, Y_1 , в которой начинается параболический участок сопла. Для этого должен быть задан угол α (в программе Alfa), определяющий направление касательной к профилю в точке X_1, Y_1 .

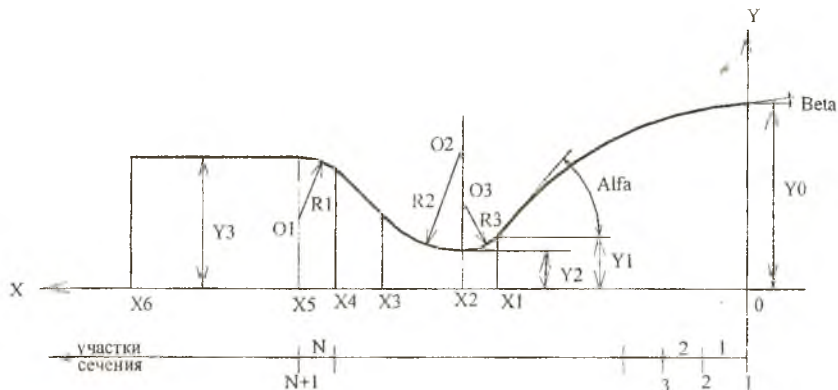


Рис. 3. Размеры газового тракта

Конический участок в сужающейся части сопла имеет образующую, начало и конец которой определяются абсциссами X_3 и X_4 . Если сужающаяся часть сопла образована сопряжением двух дуг с радиусами R_1 и R_2 , то необходимо указать абсциссу точки сопряжения $X_3=X_4$.

Примечания:

1. Размерность всех линейных величин – метры.
2. При снятии размеров профиля сопла с чертежа часто допускаются ошибки. Поэтому необходимо провести проверку выполнения условий:

$$R_1 > (X_5 - X_4);$$

$$R_2 > (X_3 - X_2),$$

что исключает появление отрицательного числа под радикалом.

3. Если же сужающаяся часть сопла образована сопряжением дуг радиусами R_1 и R_2 , то должно выполняться с точностью до 3% равенство

$$(R_1 + R_2)^2 = (X_5 - X_2)^2 + (R_2 + Y_2 + R_1 - Y_3)^2.$$

Число участков N , на которое следует разбить контур сопла поперечными сечениями, следует назначать в зависимости от длины сопла (размера X5):

X5,м	< 0,6	0,6...0.8	0,8...1,0	>1,0
N	30	35	40	45...50

Так как цилиндрическая часть камеры также будет разбита на участки с тем же шагом, что и сопло, то общее число расчетных участков будет больше N .

Параметры газа на входе в сопло, необходимые для расчета плотности конвективного теплового потока в стенку:

VS – суммарный массовый расход топлива через камеру, кг/с;

TK – температура торможения газа в пристеночном слое, К;

K – показатель изэнтропы расширения газа в сопле.

Эти параметры берутся из "Пояс. зап. по ТРД".

CP – равновесная массовая теплоёмкость газа в пристеночном слое, Дж/(кг·К);

ET – динамическая вязкость газа, Н·с/м².

Значения этих величин берутся из [6] для пристеночного слоя (при $\alpha_{пр}$).

TSH – задаваемая температура горячей поверхности стенки, К.

Последняя величина зависит от материала стенки. При использовании БрХ08 можно принять TSH = 800-850К, а при стенке из Х18Н10Т TSH=1100 - 1200К [7].

Данные для расчета плотности лучистого теплового потока:

PK – давление газа в камере сгорания, МПа;

TKR – температура газа в ядре потока, К.

Эти данные берутся из "Пояс. зап. по ТРД".

Основной лучистый поток в камерах ЖРД дают газы H₂O и CO₂. Количество их в продуктах сгорания находится в [6] для ядра потока (при $\alpha_я$):

PНО – относительное парциальное давление H₂O;

PCO₂ – относительное парциальное давление CO₂.

Кроме этого необходимо задать
ЕСТ – степень черноты стенки (приложение 2).

Данные для расчета нагрева охладителя:

Вид охладителя (водород, керосин, НДМГ, гидразин, аэрозин-50).

Для каждого охладителя в программе определяются его теплофизические свойства в зависимости от температуры.

VL – массовый расход охладителя, кг/с;

TLB – температура охладителя на входе в тракт охлаждения, К [3];

TLD – допустимая температура охладителя на выходе из тракта охлаждения, К (приложение 3).

Данные для расчета температуры стенки:

HS – толщина стенки, м;

U – коэффициент теплопроводности материала стенки при её средней температуре $TS = (THD + TD)/2$, кВт/(м·К) (приложение 4);

WD – предельная скорость течения охладителя в тракте, м/с;

TD – предельная температура холодной поверхности стенки, К (зависит от свойств охладителя);

THD – предельная температура горячей поверхности стенки, К [3].

Запись исходных данных и проведение расчета

Подготовленные исходные данные студент записывает в таблицу и согласовывает с консультантом проекта. Расчет ведётся в диалоговом режиме. По запросам машины последовательно вводятся все данные из таблицы.

В процессе выполнения расчета по программе из условия равенства плотности тепловых потоков от газа к стенке и от стенки к охладителю при стационарном режиме работы камеры определяются температуры горячей TH и холодной TC поверхностей стенки. Проверяется в критическом сечении выполнение неравенств:

$$\begin{aligned} TH &\leq THD, \\ TC &\leq TD. \end{aligned} \quad (2)$$

Если хотя бы одно из них не выполняется, то увеличивается скорость течения охладителя W путём уменьшения высоты щели охлаждающего тракта t . При этом возрастает отвод тепла от стенки в охладитель. Увеличение скорости производится, начиная с $W = 10$ м/с, до той величины, при которой выполняется условие (2), или скорость достигает WD , или высота щели $t \leq 0,001$ м. Полученные результаты выдаются в виде таблицы, вначале на экране дисплея, а затем по решению расчетчика делается её распечатка.

Расчетная таблица содержит следующие столбцы:

I – номер сечения;

X, Y – координаты точек профиля, м;

ALG – коэффициент конвективной теплоотдачи от газа в стенку, кВт/(м²·К);

qk – плотность конвективного теплового потока от газа в стенку в первом приближении, кВт/м²;

qr – плотность лучистого теплового потока в стенку, кВт/м²;

TL – температура охладителя, К;

W – скорость течения охладителя, м/с;

AL – коэффициент теплоотдачи от стенки в охладитель, кВт/(м²·К);

$qs1$ – суммарная плотность теплового потока в стенку, кВт/м²;

TH – температура горячей поверхности стенки, К;

TC – температура холодной поверхности стенки, К.

Прежде чем принять решение о печатании таблицы, необходимо внимательно просмотреть её на экране. Появление нереальных значений величин (например, отрицательных TH или TC) говорит об ошибках в исходных данных.

В конце таблицы отпечатано, выполняется или не выполняется условие обеспечения общего теплосъёма, номер критического сечения и высота (зазор) щелевого тракта. По результатам расчета необходимо построить графики TH , TC и $qs1 = f(X)$, а под осью абсцисс – профиль камеры ($Y = f(X)$).

3.1.2. Проектирование оребрения охлаждающего тракта корпуса камеры

Оребрение выполняет следующие функции: обеспечивает прочность стенки, нагруженной перепадом давления Δp , и улучшает теплоотвод от стенки в охладитель. Последнее обеспечивается только при правильно спроектированном оребрении, которое характеризуется коэффициентом эффективности оребрения k_3 [1,3].

При выполнении курсового проекта необходимо выбрать параметры оребрения так, чтобы обеспечить прочность стенки, $k_3 \geq 1$, и минимальные потери давления охладителя в тракте. Основная сложность при этом заключается в изменении геометрии корпуса и параметров рабочих процессов по его длине.

Поэтому расчет ведут для ряда сечений и полученные размеры каналов согласуют между участками стенки. В числе расчетных сечений должны быть обязательно выбраны сечения на срезе сопла, критическое и на цилиндрическом участке корпуса, а также несколько промежуточных сечений, положение которых определяют в процессе расчета.

Размеры фрезерованных каналов связаны с радиусом сечения соотношениями (рис.4):

$$s_p \cdot i = 2\pi \cdot r_x, \quad (3)$$

где $s_p = b_p + h_p$;

s_p – шаг ребер;

i – число ребер (каналов);

r_x – средний радиус охлаждающего тракта;

b_p – ширина канала;

h_p – толщина ребра.

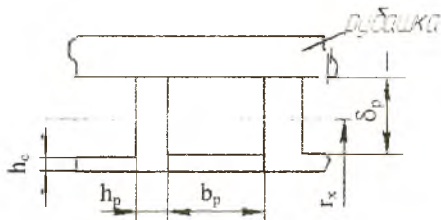


Рис.4. Размеры оребренного охлаждающего тракта

Толщину h_p и высоту δ_p ребра по длине тракта охлаждения обычно оставляют постоянными, а ширина канала b_p будет изменяться при изменении радиусов поперечного сечения сопла. При этом b_p должна оставаться в определённых пределах:

$$b_{p \min} \leq b_p \leq b_{p \max}, \quad (4)$$

где $b_{p \min}$ – минимальная ширина канала из условия допустимых гидравлических потерь;

$b_{p \max}$ – максимальная ширина канала по условию прочности [1]:

$$b_{p \max} = h_c \sqrt{\frac{2\sigma_T}{[n_T]\Delta p}}; \quad (5)$$

h_c – толщина стенки;

σ_T – предел текучести материала стенки при её средней температуре в данном сечении сопла;

$[n_T]$ – рекомендованный коэффициент запаса по пределу текучести;

$\Delta p = p_x - p_T$ – перепад давления на стенке;

p_x, p_T – давления охладителя и газа в данном сечении.

Изменение давления газа в сопле и давление охладителя на входе и выходе из тракта определены в "Пояс. зап. по ТРД". Условно можно принять, что изменение давления охладителя p_x в тракте следует линейному закону и в любом сечении это давление можно найти из выражения

$$p_{xi} = (p_{x \text{ вх}} - p_{x \text{ вых}}) \frac{X6 - Xi}{X6} + p_{ж \text{ вых}}, \quad (6)$$

где $p_{x \text{ вых}} = p_k + \Delta p_{\text{ф}}$; $X6$ – длина камеры (рис.3).

Расчет $b_{p \max}$ в характерных сечениях камеры

Прежде всего, используя выражение (5), необходимо определить $b_{p \max}$ в сечениях $кр.$, c и a (рис.5). В табл. 2 приведены значения пределов текучести основных материалов стенки. Средняя температура стенки в данном сечении определяется по данным из распечатки расчета OXLADA:

$$TS = 0,5(TH + TC).$$

Пределы текучести основных материалов стенки

Температура стенки, TS		σ_T , МПа	
		Материал стенки	
T, К	t, °C	БрХ08	12Х18Н9Т
293	20	220	280
473	200	220	-
573	300	200	200
773	500	150	180
873	600	120	-
1073	800	-	100

Если её величина на каких-либо участках превышает максимально допустимую температуру для применяемых материалов, то последующими мероприятиями её необходимо будет снизить до допустимого уровня. Поэтому на этих участках в предварительном расчете принимается σ_T , равное значению при максимально допустимой температуре.

Рекомендуемый коэффициент запаса $[n_T] = 1,5$. Давление газа в сечениях c и a известно, в критике можно принять $p_{кр} \approx 0,5p_k$. Давление охладителя определяется по формуле (6).

Оребрение средней части корпуса

Вначале определяют параметры оребрения (i , b_p , s_p) в критическом сечении. При этом исходят из того, что в этом сечении ширина каналов должна быть близка к минимальной.

Примем $b_{ркр} = 0,5 b_{p \max \text{ кр}}$ при условии, что $1,5 \text{ мм} \leq b_{ркр} \leq 3 \text{ мм}$. Назначив ширину ребра $h_p = 1 \dots 1,5 \text{ мм}$ (но при $h_p \leq b_{ркр}$), определяем предварительно шаг ребер в критике:

$$s_{p \text{ пред}} = b_{p \text{ кр}} + h_p.$$

Средний радиус охлаждающего тракта в этом сечении можно принять равным $r_{x \text{ кр}} = r_{кр} + h_c + 0,5 t$, где t – высота щелевого тракта. Тогда предварительное число ребер в критике

$$i_{кр \text{ пред}} = 2\pi (r_{кр} + h_c + 0,5 t) / s_{p \text{ пред}}.$$

Округляя полученный результат до целой величины (желательно округлять в большую сторону до величины, кратной 90), обратным пересчётом находим окончательные параметры оребрения в критике: $i_{кр}$, $b_{кр}$ и $s_{кр}$.

Необходимо, чтобы $b_{кр}$ удовлетворяло неравенству (4). После этого можно найти зазор между стенками (высоту ребра)

$$\delta_p = t s_p / b_p.$$

Число ребер, принятое в критическом сечении, часто удаётся сохранить и на цилиндрическом участке стенки корпуса. В этом случае шаг ребер на нём определяют из пропорции (для сечения c)

$$s_{pC} / s_{pкр} = r_{xC} / r_{xкр} \approx r_C / r_{кр}$$

и проверяют выполнение условия

$$b_{pC} = s_{pC} - h_p < b_{pC \max}.$$

При невыполнении этого условия число ребер на цилиндрическом участке обычно удваивают, начиная со среднего радиуса сужающейся части сопла,

$$r_{cp} = (r_{pC} + r_{кр}) / 2.$$

Оребрение расширяющейся части сопла

Оребрение этой части сопла проще начинать с критического сечения. По направлению к срезу сопла при постоянном числе ребер расстояние между ними b_p будет непрерывно увеличиваться. В тех сечениях, где b_p достигнет значения $b_{p \max}$, число ребер необходимо увеличивать. Из технологических соображений это число желательно изменять в целое число раз (обычно в 2 раза). Тогда возможно фрезерование части ребер на всей длине данной секции сопла за один проход.

Приближённо можно считать, что увеличение числа ребер необходимо в сечениях, в которых наступает равенство $b_p = (2 \dots 3) b_{pкр}$.

Исходя из этого, найдем радиус сечения 1 (рис.5), в котором необходимо увеличение числа ребер, из соотношения

$$r_1 = r_{кр} (3 b_{pкр} + h_p) / s_{кр}.$$

Начиная с этого сечения, примем число ребер $i_2 = 2 i_{кр}$. В сечении 1 необходимо найти значение b_p слева и справа от этого сечения. Так, справа от этого сечения шаг ребер

$$s_{1np} = 2 \pi r_1 / i_2,$$

$$b_{p1np} = s_{1np} - h_p.$$

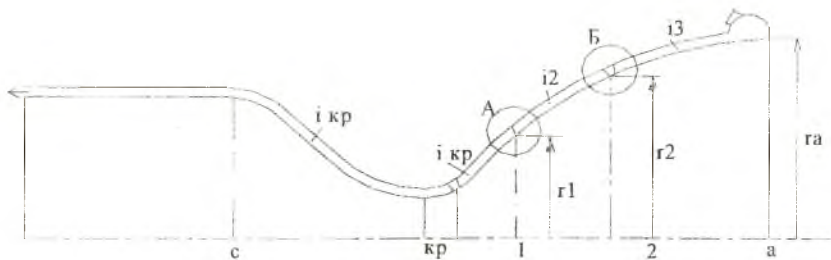


Рис. 5. Схема расположения участков с разным числом ребер

Далее находим сечение 2, в котором опять увеличиваем число ребер в 2 раза:

$$r_2 = r_1 (2b_{p1np} + h_p) / s_{1np}.$$

В этом месте также находим b_p по обе стороны от сечения. Если длина расширяющейся части сопла не превышает 1,5м, то часто достаточно трёх участков с различным числом связей. Минимальное число связей на последнем участке получится, если находить это число для среза сопла (по $b_{p \max a}$). При этом предварительные шаг связей и их число:

$$s_{pa \text{ пред}} = b_{p \max a} + h_p, \quad i_{a \text{ пред}} = 2 \pi r_a / s_{pa \text{ пред}}.$$

Округляя это число в большую сторону до целой величины, получим необходимые i_a , s_{pa} и b_{pa} . Обязательно надо проверить остался ли проход для охладителя на меньшем радиусе этого участка (в ссч.2), определив s_{p2np} справа от сечения 2 из пропорции

$$r_2 / r_a = s_{p2np} / s_{pa}, \quad b_{p2np} = s_{p2np} - h_p.$$

Надо иметь $b_{p2np} \geq 1.5\text{мм}$. Если это условие не выполняется, необходимо дополнительный участок с числом связей, промежуточным между i_2 и i_3 .

Количество участков с разным числом ребер на расширяющейся части сопла должно быть минимальным. Сопла камер средней тяги обычно имеют 3...5 участков.

Замечания:

1. Сечения, в которых изменяется число ребер, необходимо совмещать с ближайшими сечениями из распечатки OXLADA.

2. Если в сечении изменение числа ребер не кратно 2, то в этом месте протачивают кольцевую канавку шириной 3-4мм (место Б на рис.5) для выхода фрезы.

3. На отдельных участках оребрѐнную стенку можно заменить стенкой с гофрированной проставкой. При этом можно приближѐнно принять, что шаг гофров проставки $s_r = 2s_p$, а $b_r \approx b_p$.

После выполнения оребрения рассчитывают коэффициент эффективности ребер k_3 [1] в критическом сечении. Результаты всего расчета сводят в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета оребрения стенки

Номер сечения	Δp , МПа	TS, К	σ_r , МПа	b_{rmax} , м	Число ребер, i	b_r , м	δ_r , м	k_3	Примечание
Кр									
С									
А									
1									

3.1.3. Расчет температуры стенки с учётом оребрения

В результате увеличения теплоотдающей поверхности у оребрѐнной стенки теплоотвод от неё усиливается, что учитывается коэффициентом эффективности оребрения. В курсовом проекте достаточно определить температуру оребрѐнной стенки только в критическом сечении.

В нижеприведѐнной методике расчета предполагается, что после оребрения коэффициент теплоотдачи от газа в стенку ALG остаѐтся неизменным, так как температура стенки при этом изменяется

незначительно. Также считается неизменной и температура охладителя в критическом сечении.

Порядок расчета

1. Определяем коэффициент теплоотдачи от оребрѐнной стенки в охладитель

$$AL_p = AL (d_3 / d_{3p})^{0.2} k_3,$$

где AL – коэффициент теплоотдачи в охладитель при щелевом тракте;
 k_3 – коэффициент эффективности оребрения;
 d_3 – эквивалентный диаметр щелевого охлаждающего тракта, м;
 $d_3 = 2t$, где t – высота щелевого тракта;
 d_{3p} – эквивалентный диаметр оребрѐнного охлаждающего тракта.

$$d_{3p} = \frac{2b_p \delta_p}{b_p + \delta_p}, \quad (7)$$

где b_p , δ_p – размеры, показанные на рис.4.

2. Определяем температуру холодной поверхности стенки с оребрением

$$TC_p = \frac{Al_p \cdot B \cdot TL + TK - qr / ALG}{Al_p \cdot B + 1}, \quad (8)$$

где TL – температура охладителя в данном сечении;
 TK – температура газа в пристеночном слое;
 qr – плотность лучистого теплового потока;
 ALG – коэффициент конвективной теплоотдачи от газа в стенку;

$$B = HS/U + 1/ALG,$$

где HS – толщина стенки;

U – коэффициент теплопроводности материала стенки.

3. Находим плотность теплового потока при оребрѐнном тракте

$$q_p = (TK - TC_p + qr / ALG) / B. \quad (9)$$

4. Находим температуру горячей поверхности стенки с оребрением

$$TH_p = q_p HS/U + TC_p. \quad (10)$$

При $k_3 > 1$ должно получиться $TC_p < TC$, $TH_p < TH$, $q_p > qs1$.

Анализ результатов расчета системы регенеративного охлаждения

На основании полученных результатов необходимо сделать вывод о выполнении условий надёжности регенеративного охлаждения [1].

В курсовом проекте достаточно показать, что условия общего и местного теплосъёма для оребрѐнного тракта выполняются на наиболее теплонапряжѐнном участке стенки – в зоне критического сечения. В этом случае расчет теплозащиты корпуса завершѐн.

Если же и с учетом k , условия надёжности охлаждения не выполняются, необходимо принимать меры по усилению теплозащиты камеры.

Если не обеспечивается общий теплосъём, то можно применить теплоизолирующее покрытие, завесное охлаждение или регенеративное охлаждение обоими компонентами. Можно уменьшить охлаждаемую поверхность камеры, применив сопловой насадок без регенеративного охлаждения.

Чаще всего не выполняются условия местного теплосъёма, особенно в зоне критического сечения. В этом случае, кроме уже указанных мероприятий, используют способы, интенсифицирующие теплосъём охладителем (путѐм увеличения W_x за счет уменьшения зазора между стенками, применения спирального оребрения или созданием соответствующей шероховатости охлаждаемой поверхности).

Рассмотрим порядок расчета систем теплозащиты при использовании некоторых дополнительных способов повышения её эффективности. С целью упрощения расчеты проводятся только для критического сечения. При этом подогрев охладителя в тракте будем определять приближѐнно, учитывая, что его значение пропорционально величине теплового потока:

$$\Delta T_{x2} = \Delta T_{x1} \frac{q_{x1}}{q_{x2}},$$

где ΔT_{x1} и ΔT_{x2} – подогрев охладителя в тракте охлаждения до и после проведения данного мероприятия;

q_{x1} и q_{x2} – плотности теплового потока, соответствующие первому и второму случаю.

Рассчитывать величину подогрева следует только в том случае, если не выполняется условие общего теплосъёма.

3.1.4. Применение спирального оребрения

Для большего отвода тепла от стенки охлаждающий тракт выполняют в виде большого числа спиральных каналов, которые получаются в результате фрезерования ребер по винтовой линии или при соответствующей установке гофрированных проставок. Такое оребрение характеризуется углом φ между образующей оболочки и направлением каналов (рис. 6). При фрезеровании на пологих участках стенки можно получить $\varphi = 15...20^\circ$, на конических участках с большой крутизной $\varphi \leq 15^\circ$. Гофрированные проставки позволяют иметь $\varphi = 40...50^\circ$.

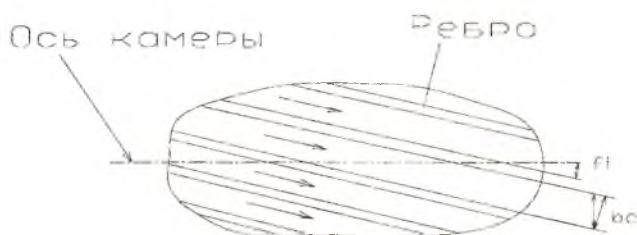


Рис. 6. Спиральное оребрение стенки

При одном и том же числе связей и одинаковой их высоте спиральное оребрение по сравнению с прямым позволяет уменьшить ширину каналов b_c и площадь проходного сечения F_x :

$$b_c = b_p \cos \varphi;$$

$$F_x = i \delta_p b_p \cos \varphi,$$

где i – число каналов.

При этом скорость течения охладителя становится равной

$$W_c = W / \cos \varphi,$$

что приводит к усилению отвода тепла от стенки. Кроме того, при спиральном оребрении увеличивается коэффициент эффективности оребрения.

Расчет спирального оребрения может быть проведён по той же методике, что и прямого. При этом коэффициент теплоотдачи от стенки в охладитель определяется по формуле

$$AL_{\text{с}} = AL (d_{\text{с}} / d_{\text{ж}})^{0,2} (W_{\text{с}} / W)^{0,8} k_{\text{с}},$$

где $d_{\text{с}}$ – эквивалентный диаметр спиральных каналов, определяемый выражением (7) с учетом новой ширины $b_{\text{с}}$;

$k_{\text{с}}$ – коэффициент эффективности спирального оребрения.

Выражения (8) и (9) остаются в силе. Коэффициент эффективности спирального оребрения можно найти по формуле [7]

$$k_{\text{с}} = 1 + \frac{1}{\cos \varphi} \left[2 \frac{\delta_{\text{п}}}{s_{\text{п}}} \frac{\text{th} \xi}{\xi} - \frac{h_{\text{п}}}{s_{\text{п}}} \right].$$

Обозначения всех входящих сюда величин и график для определения $\frac{\text{th} \xi}{\xi}$ приведены в [1].

3.1.5. Использование теплоизолирующего покрытия

Теплоизолирующее покрытие наносится на внутреннюю (горячую) поверхность стенки камеры, имеет низкую теплопроводность и высокую температуру плавления. Свойства некоторых теплоизолирующих покрытий приведены в пособии [1]. Наиболее часто для этой цели используют двуокись циркония ZrO_2 .

Коэффициенты линейного расширения α и модуль упругости E материалов покрытия и стенки значительно отличаются друг от друга. Поэтому при температурных и силовых деформациях стенки камеры может произойти растрескивание и отслоение покрытия. Вероятность разрушения покрытия возрастает с увеличением его толщины. В курсовом проекте рекомендуется применять покрытие толщиной не более 0,5мм.

Целью расчета является определение толщины покрытия, при которой выполнялись бы условия надёжности регенеративного охлаждения.

В приближённом расчете принимают, что коэффициент теплоотдачи от стенки в охладитель (AL), плотность лучистого теплового

потока от газа в стенку (qg) и температура охладителя (TL) при нанесении покрытия не изменяются. В связи с тем, что температура на поверхности покрытия $T_{пр}$ весьма велика, происходит заметное изменение коэффициента теплоотдачи от газа в стенку ALG .

Новую величину его можно определить, используя методику пересчета плотности конвективного теплового потока [1, 9]. В приближенном расчете можно принять, что после нанесения покрытия $ALG_n = (0,7 \dots 0,75) ALG$.

Затем назначают температуру на горячей поверхности покрытия и определяют плотность теплового потока от газа при этой температуре. Используя эти величины, рассчитывают толщину покрытия и температуры стенки.

Расчет проводят для критического сечения сопла в следующем порядке: выбирают вид покрытия, его теплопроводность λ_n и допустимую температуру его горячей поверхности $T_{шд}$ [1].

Назначают температуру на горячей поверхности покрытия

$$T_{пр} = T_{шд}.$$

Если $T_{прд}$ больше температуры газа в пристенке ТК, то принимают температуру горячей поверхности покрытия, равной

$$T_{пр} = TK - (100 \dots 200)K.$$

При наличии покрытия плотность теплового потока в стенку

$$qs_n = ALG_n (TK - T_{пр}). \quad (11)$$

Из условия передачи этого теплового потока в охладитель

$$qs_n = AL_p (TC_n - TL)$$

определяют температуру холодной поверхности стенки при наличии покрытия:

$$TC_n = qs_n / AL_p + TL \quad (12)$$

(при применении спирального оребрения вместо AL_p используется AL_c).

После этого необходимо проверить выполнение неравенства $TC_n < TCD$. Если оно не выполняется, то с выбранным покрытием удовлетворить условию местного теплосъема невозможно.

Затем находят температуру горячей поверхности стенки при наличии покрытия

$$T_{H_{II}} = T_{C_{II}} + q_{S_{II}} \cdot HS / U \quad (13)$$

и толщину покрытия

$$h_{II} = (T_{II} - T_{H_{II}}) \cdot \lambda_{II} / q_{S_{II}}$$

Проверяют условие $h_{II} \leq 0,5\text{мм}$.

При невыполнении этого условия и требования $T_{C_{II}} < T_{CD}$ остаётся принять толщину покрытия равной 0,5мм и рассчитать температуры с этим покрытием. В этом случае толщина покрытия задана, а плотность теплового потока в охладитель будет равна

$$q_{II} = \frac{TK - TL}{\frac{1}{ALG_{II}} + \frac{h_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{HS}{U} + \frac{1}{AL_p}}$$

Искомые температуры определяются из выражений (11), (12) и (13) при $q_{S_{II}} = q_{II}$.

Если после расчета выполняются все условия надёжности охлаждения, то проектирование теплозащиты можно считать законченным. Полученная толщина покрытия сохраняется на всём участке стенки, где раньше не выполнялись условия надёжности охлаждения.

При невыполнении этих условий при $h_{II} = 0,5\text{мм}$ необходимо покрытие дополнить другими мерами, снижающими температуру стенки, например, применением завесного охлаждения.

3.1.6. Использование завесного охлаждения

Применение плёночного завесного охлаждения дополнительно к уже рассчитанному внутреннему охлаждению пристеночными форсунками приведёт к уменьшению удельного импульса. Поэтому такой способ снижения температуры стенки следует применять в последнюю очередь.

В то же время, если внутреннее охлаждение проектируется без пристеночных форсунок с использованием только поясов завесы, то может быть получен более тонкий пристеночный слой, снижены потери в камере и повышена её экономичность. Конструкция поясов

завесы рассмотрена в работах [1, 3]. Пояс завесы располагают в начале участка стенки, на котором температуры ТН и ТС превышают допустимые значения. За завесой стенка на некотором участке защищена жидкостной плёнкой, которая затем испаряется, в результате чего изменяется соотношение компонентов и понижается температура в пристеночном слое. В приближённом расчёте учитывается только эффект от изменения соотношения компонентов.

Примем допущение, что сразу после пояса завесы устанавливается соотношение компонентов топлива $k_{мз}$, в результате чего температура торможения пристеночного слоя становится равной T_3^* и остаётся постоянной до конца камеры или до следующего пояса завесы.

Для снижения температуры стенки в критическом сечении пояс завесы устанавливают на входе в сопло (в сечении С). Необходимую температуру T_3^* , при которой температура стенки в критическом сечении будет в допустимых пределах, определим из уравнения теплового баланса для этого сечения

$$ALG (T_3^* - THD) = AL_p (TD - TL),$$

откуда

$$T_3^* = \frac{AL_p (TD - TL)}{ALG} + THD.$$

Здесь значения ALG , AL_p и TL берутся для критического сечения. При наличии теплоизолирующего покрытия вместо THD необходимо в формулу подставить $T_{шт}$.

Затем по величине T_3^* , используя [6] или приложение 6, найдём необходимое соотношение компонентов топлива в пристеночном слое после завесы $k_{мз}$.

Расход горючего на завесу $\dot{m}_{гз}$ определится из выражения

$$k_{мз} = \frac{\dot{m}_{опр}}{\dot{m}_{гпр} + \dot{m}_{гз}},$$

где $\dot{m}_{опр}$ и $\dot{m}_{гпр}$ – расходы окислителя и горючего в пристенке до пояса завесы.

Этот расход можно найти и по формуле [1]

$$\dot{m}_{гз} = \frac{k_{mc} - k_{mз}}{k_{mз}(k_{mc} + 1)} \dot{m}_{пр},$$

где k_{mc} – массовое соотношение компонентов в пристеночном слое до постановки завесы;

$\dot{m}_{пр}$ – расход топлива в пристеночный слой.

В заключение расчета, используя [1], необходимо определить удельный импульс тяги при наличии завесы $I_{yз}$ и оценить, насколько его изменение отразится на заданных параметрах двигателя.

3.2. Конструирование камеры двигателя

На основании ранее выполненного термогазодинамического расчета и результатов проектирования теплозащиты студент должен сконструировать камеру двигателя. Результатом этой работы должен быть сборочный чертёж камеры, из которого понятна конструкция всех элементов и порядок сборки камеры. При выборе конструктивных решений студент ориентируется на уже изученные двигатели, атлас чертежей камер [9, 10], кафедральный электронный банк данных 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.

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].

Ниже изложены некоторые рекомендации по конструированию и технологии изготовления таких камер, ранее рассмотренные в пособии [4].

3.2.1. Конструирование смесительной головки

В «Пояс. зап. по ТРД» 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.

Основным конструктивным элементом головки является форсуночный блок, состоящий из корпуса головки, внутреннего и среднего днищ и форсунок.

Внутреннее днище, изготавливаемое из стали или бронзы, штампуют из листа с отбортовкой кромки, которую затем обтачивают. Среднее стальное днище штампуют совместно с корпусом головки или отдельно, а затем приваривают к нему. В кондукторе в обоих днищах совместно сверлят отверстия под силовые (длинные)

форсунки. Если форсунки однокомпонентные, то во внутреннем днище также по кондуктору сверлят отверстия под короткие форсунки.

Схемы соединения форсунок с днищами показаны на рис.7.

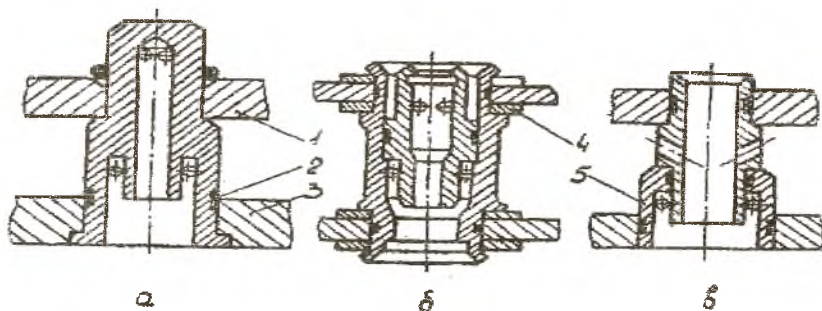


Рис. 7. Схемы соединения форсунок с днищами головок при достаточной (а, в) и недостаточной для пайки толщине днищ (б): 1 – среднее днище; 2 – колечко припоя; 3 – внутреннее днище; 4 – прокладки из более мягкого металла; 5 – малорасходная форсунка

Форсунки изготавливают точением из прутка. На цилиндрической внешней поверхности протачивают одну или две канавки глубиной 0,5 мм и шириной 2 мм для установки колечек припоя. Колечки имеют поперечный разрез, одеваются на форсунку и обжимаются в канавку специальными щипцами. Иногда на наружной поверхности среднего днища отверстия под форсунки зенкуют, а колечко припоя надевают на форсунку сверху (рис.7, а). При этом припой не растекается по поверхности днища, а проникает в зазор между форсункой и днищем.

Высота паяного шва по условию прочности должна быть не менее 3мм. Поэтому канавка под колечко припоя иногда несколько выступает над поверхностью внутреннего днища.

Если днища имеют толщину менее 3 мм, то для обеспечения прочности соединения производят предварительную развальцовку концов форсунок, а для обеспечения герметичности – пайку (рис.7, б). С этой же целью иногда на нижнем конце форсунки делают буртик, а в отверстии внутреннего днища – цилиндрическое углубление.

Буртик также предотвращает вытекание припоя из зазора между форсункой и днищем.

В некоторых головках с тонкими днищами для увеличения прочности и жесткости форсуночного блока днища по периферии привариваются к кольцу с радиальными отверстиями, через которые охладитель поступает в их внутреннюю полость (рис. 8).

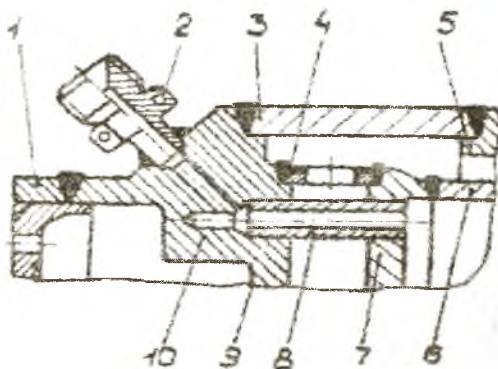


Рис.8. Схема соединения головки с корпусом камеры: 1 – газовод; 2 – штуцер для измерения давления газа в камере; 3 – соединительное кольцо; 4 – кольцо с радиальными отверстиями; 5 – рубашка корпуса камеры; 6 – стенка корпуса; 7 – внутреннее днище головки; 8 – втулка, 9 – среднее днище, 10 – корпус головки

В головках теплонапряжённых камер для улучшения охлаждения внутреннего днища используют дефлектор (песиловое днище), установленный в полости между внутренним и средним днищами (рис. 9). Один из способов крепления дефлектора показан на рис. 10. Охладитель, поступающий в полость между внутренним днищем и дефлектором, через отверстия в последнем проходит в полость между дефлектором и средним днищем и попадает в форсунки. Зазор между внутренним днищем и дефлектором выбирают из условия получения необходимой скорости течения охладителя.

Другим способом усиления теплозащиты внутреннего днища является применение дополнительных малорасходных форсунок, дополнительных каналов в основных форсунках (см. рис.7,в) или же сверлений в самом днище.

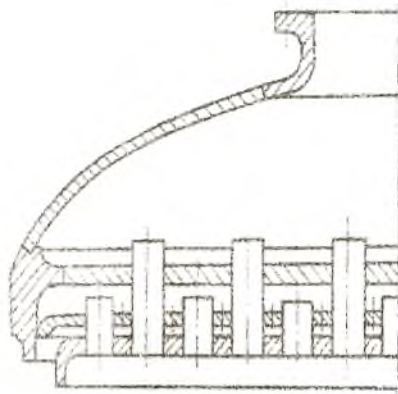


Рис. 9. Схема головки с дефлектором

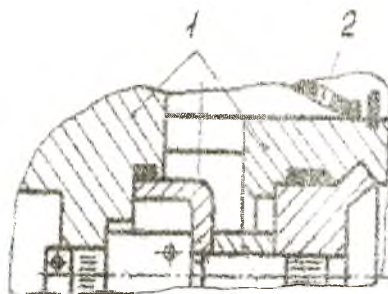


Рис. 10. Один из способов крепления дефлектора: 1 – корпус головки, к которому пайкой и развальцовкой присоединено внутреннее днище и припаян дефлектор; 2 – фильтр

Сборка форсуночного блока производится в следующем порядке. В кольцевые канавки форсунок закладывают колечки припоя, вставляют форсунки во внутреннее днище и одевают среднее днище. Сверху на силовые форсунки также устанавливают колечки припоя. Затем форсуночный блок устанавливают в контейнер, который заваривают. Через два штуцера контейнер продувают нейтральным газом, а затем заваривают и эти штуцера. Это необходимо для того, чтобы не было окисления припоя при пайке. После пайки в печи контейнер вместе с ней остывает, так как при быстром охлаждении на воздухе в деталях блока, изготовленных из материалов с разными

коэффициентами теплового расширения, могут возникнуть большие остаточные напряжения.

Наконец, проводят технологические испытания форсуночного блока [3] и, если предусмотрена установка кольца, соединяющего по периферии днища, производят его приварку.

С целью увеличения изгибной жесткости форсуночного блока при большом диаметре головок (более 0,2м) среднее днище связывают с наружным днищем с помощью ребер жесткости (кольцевых или радиальных), которые привариваются к днищам с таким расчетом, чтобы не мешать входу компонента топлива в форсунки. При меньших диаметрах эти днища могут быть соединены удлиненными форсунками-штифтами. При другом способе увеличения жесткости блока днищ среднее днище изготавливают выгнутым с большим радиусом кривизны в сторону внутреннего днища, и оно работает при действии перепада давления на растяжение, а не на изгиб.

Наружное днище головок, подающих в камеру оба жидких компонента, имеет сферическую или эллиптическую форму и приварено к корпусу головки. Если имеются кольцевые ребра жесткости, то наружное днище состоит из отдельных колец, привариваемых к ребрам и к корпусу головки. Поскольку эти швы являются "закрытыми" (к ним нет доступа изнутри для зачистки), то их необходимо варить с подкладкой, предотвращающей попадание расплавленного металла внутрь полости. В центре наружного днища обычно приваривают патрубок с фланцем для подвода одного из компонентов топлива.

В газожидкостных головках наружное днище имеет коническую или расширяющуюся тороидальную форму [3]. Угол конуса или степень расширения тороидального наружного днища выбирают из условия безотрывного течения газа.

В тороидальном газоведе, соединяющем турбину с головкой, газовый поток поворачивается и на газ действует центробежная сила. В результате плотность газа и его давление по поперечному сечению газоведа и головки будут неодинаковыми.

Для выравнивания поля давления перед форсунками внутри наружного днища устанавливают газораспределительную решетку (см. рис. 8).

У тороидального днища максимальные напряжения от давления газа возникают на образующей минимального радиуса. Поэтому его изготавливают с переменной толщиной стенки литым или сваркой из трех штампованных частей и к узкому концу приваривают фланец (рис. 11).

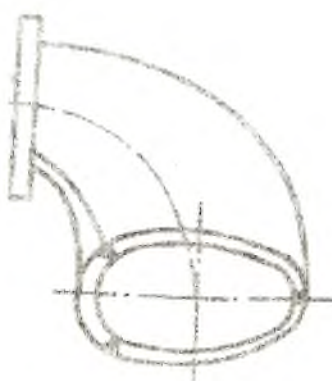


Рис. 11. Схема тороидального наружного днища

Установка воспламенителей и штуцеров. Если пиро- или электроискровой воспламенители расположены на головке, то они сообщаются с огневой полостью камеры с помощью трубки, вставленной в днища вместо центральной форсунки, или же с помощью втулки (рис. 12, б), вставленной в сверления в корпусе головки и во внутреннем днище. Иногда пировоспламенитель устанавливается перпендикулярно оси камеры на соединительном кольце корпуса головки с корпусом камеры (рис. 12, а).

Штуцеры для измерения давления компонентов топлива в полостях головки устанавливают на наружном днище и на кольце, соединяющем корпус головки с рубашкой корпуса камеры. Штуцер должен иметь шестигранный выступ для удержания его ключом при затяжке ниппельного соединения, так как иначе можно разрушить сварку. Штуцер для измерения давления газа в камере сгорания часто приваривают на корпусе головки и сообщают его с огневой полостью камеры через сверление в корпусе и втулку, установленную вместо форсунки (см. рис. 8).

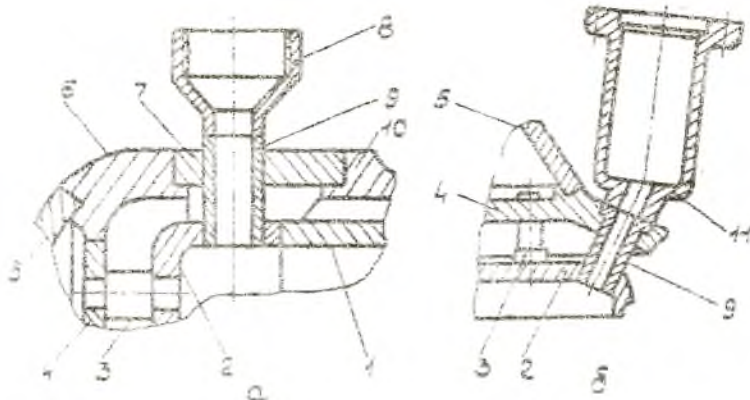


Рис. 12. Схемы установки воспламенителя: а – на кольце, соединяющем смесительную головку с корпусом; б – на корпусе смесительной головки; 1 – стенка корпуса камеры; 2 – внутреннее днище; 3 – форсунка; 4 – среднее днище; 5 – наружное днище; 6 – корпус головки; 7 – соединительное кольцо; 8 – штуцер для установки пиросвечи; 9 – переходная втулка; 10 – корпус камеры; 11 – корпус пиросвечи

После изготовления головки проводят ее технологические испытания, аналогичные испытаниям форсуночного блока, обезжиривают, сушат и клеймят.

Основные ТУ на изготовление головки приведены в пособии [3]. Для головки камеры диаметром 0,4 м одного из ЖРД некоторые требования имеют следующие числовые значения:

- неплоскостность внутреннего днища – не более 2 мм;
- выступание торцов форсунок над внутренним днищем – не более 1 мм;
- биение наружной поверхности бурта внутреннего днища – не более 0,5 мм;
- биение торца бурта внутреннего днища – не более 0,5 мм;
- радиальное и торцевое биения центрального фланца – не более 0,5 мм;
- биение наружного днища головки (оно является базовой деталью при сборке головки с корпусом камеры) – 0,3 мм.

3.2.2. Конструирование корпуса камеры

Корпус камеры (рис. 13) состоит из стенки и рубашки, соединенных между собой по поверхностям пайкой гофрированных проставок или ребер, полученных фрезерованием канавок на наружной поверхности стенки. Преимущества соединения с помощью ребер 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.

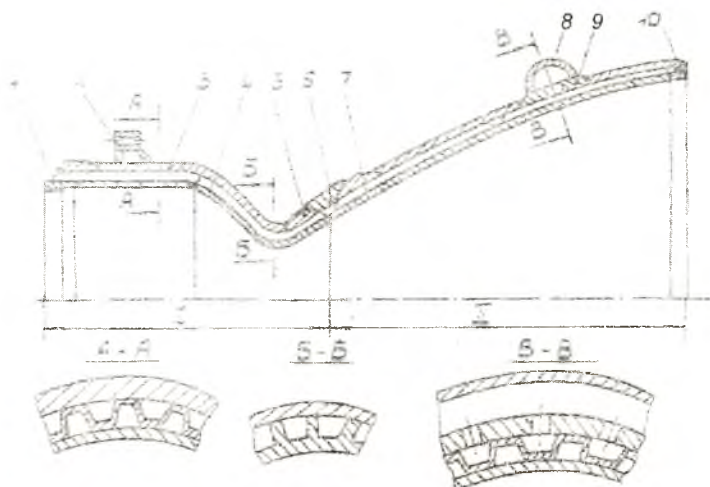


Рис.13. Схема корпуса паяно-сварной камеры: 1 – утолщенное кольцо стенки; 2 – узел крепления камеры к раме ЛА; 3 – рубашка; 4 – стенка; 5 – переходное кольцо; 6 – соединительное кольцо; 7 – гофрированная проставка; 8 – обечайка коллектора; 9 – распределительное кольцо; 10 – замыкающее кольцо

Поэтому в местах с двойной кривизной (в сужающейся 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. Как стенка, так и рубашка каждой сборочной единицы корпуса могут состоять из нескольких деталей, соединенных сваркой, причем после сварки швы обязательно зачищают.

Конструкция элементов корпуса тесно увязана с технологией их изготовления. Поэтому необходимо кратко её рассмотреть.

Если соединение рубашки и стенки производится с помощью ребер, то для заготовки стенки выбирают лист с учетом толщины стенки, высоты ребра и припусков на механическую обработку. Стенку сужающейся части сопла вместе с небольшим участком расширяющейся его части получают путем глубокой вытяжки из листа. При этом некоторый участок расширяющейся части сопла вначале имеет цилиндрическую форму (см. рис. 16,а) с внутренним диаметром, равным диаметру критического сечения. Затем стенку обтачивают до получения заданной толщины.

Фрезерование канавок осуществляя парой фрез (рис. 14,а), в том сечении, где эта ширина канавки становится больше максимально допустимой, число ребер удваивают (рис. 14,б).

Минимальные диаметр фрезы – 40 мм, толщина – 1 мм. Эти размеры определяют минимальный меридианальный радиус кривизны стенки и минимальную ширину канавок. Фрезеруют и винтовые ребра с углом наклона к образующей, равным 15...20°.

Если на соседних участках число ребер не кратно друг другу, между ними протачивают кольцевую канавку для выхода фрезы. Ширина канавки по условиям обеспечения местной прочности должна быть не более 3...4 мм. Такое же расстояние выдерживают и между концами гофрированных проставок.

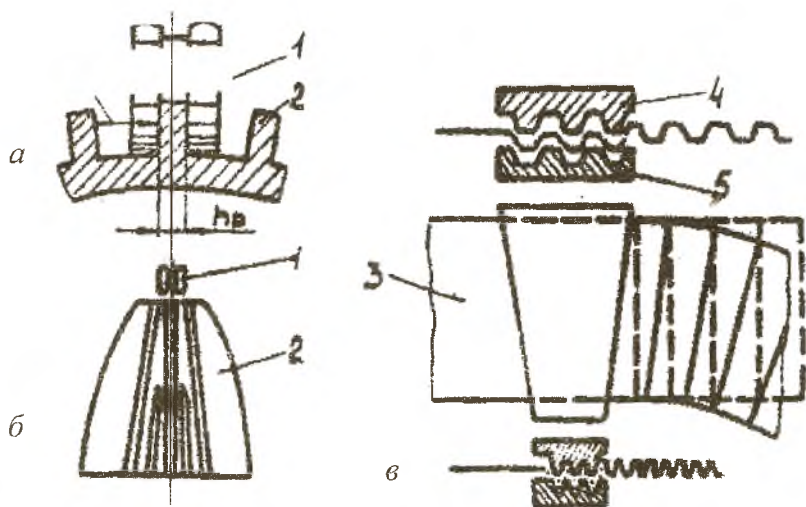


Рис. 14. Схемы фрезерования канавок на наружной поверхности стенки (а), удвоения ребер (б) и штамповки гофров (в): 1 – фреза; 2 – ребро стенки; 3 – заготовка для гофрирования; 4 – матрица; 5 – пуансон

На участках корпуса, где соединение его элементов осуществляют с помощью гофрированных проставок, стенку и рубашку изготавливают из листового материала гибкой на трехвальной гибочной машине со сменными валками с последующей сваркой продольного шва. Конической заготовке затем с помощью штампа придают профилированную форму.

Гофрированную проставку штампуют из листовой заготовки в специальном штампе (рис. 14, в), сворачивают и боковые кромки сваривают встык. Для профилированной расширяющейся части сопла изготавливают несколько конических секций с шагом гофра, изменяющимся по их длине, а затем в специальном штампе формируют необходимый профиль. Длина секции в этом случае ограничена деформацией, допустимой при ее профилировании, а не величиной изменения шага гофра по условию обеспечения местной прочности стенки [1].

К торцам рубашки приваривают утолщенные переходные кольца (см. рис. 15, поз. 5), которые повышают ее жесткость в местах со-

единения с другими сборочными единицами. Кроме того, они позволяют устранить появление распая шва между ребром и рубашкой в момент приварки соединительного кольца. Переходное кольцо может быть приварено и к торцу стенки малой толщины – для обеспечения качественного сварного шва стенки с отбортовкой внутреннего днища (см. рис. 15, поз. 1). Подобную же конструкцию используют в случае, если материалы деталей стенки плохо свариваются. При этом кольцо изготавливают из материала, который хорошо сваривается с обеими деталями (например, для сварки бронзы БрХ08 со сталью 12Х18Н9Т используют переходное кольцо из стали 12Х21Н5Т). Если же материалы деталей не свариваются (например, бронза или сталь с титановым сплавом), то используют так называемое резьбопаяное соединительное кольцо, одна деталь которого изготовлена из бронзы, а другая – из титанового сплава. Эти детали соединяются резьбой с последующей пайкой (рис. 15).

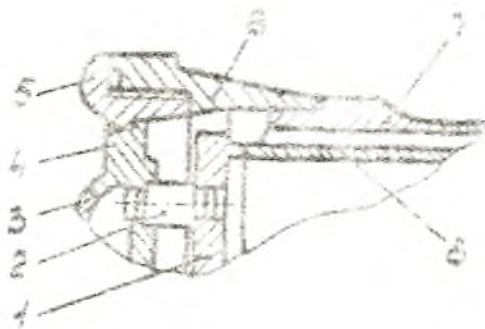


Рис. 15. Схема установки паяного соединительного кольца: 1 – внутреннее днище; 2 – форсунка; 3 – наружное днище головки; 4 – корпус головки со средним днищем; 5 – стальное переходное кольцо головки; 6 – титановое переходное кольцо рубашки корпуса; 7 – переходное кольцо; 8 – стенка

Сборка средней части корпуса под пайку. Вначале производят подгонку стенки к рубашке. Для этого внутреннюю поверхность рубашки покрывают мелом, надевают рубашку на стенку, а после снятия ее проверяют плотность прилегания ребер к рубашке.

При необходимости вновь надсают рубашку и производят обстукивание стенки в местах неприлегания ребер. Затем соответст-

вующие поверхности стенки и рубашки подвергают травлению для удаления с них окислов и загрязнений, наносят припой напылением или в виде фольги.

После этого производят окончательную сборку и развальцовывают начальный цилиндрический участок стенки расширяющейся части сопла до получения плотного прилегания ребер к поверхности рубашки (рис. 16). Кольцевая проточка в ребрах 6 (см. рис. 16) предотвращает их боковое выпучивание при больших углах развальцовки стенки в сопле с угловым входом.

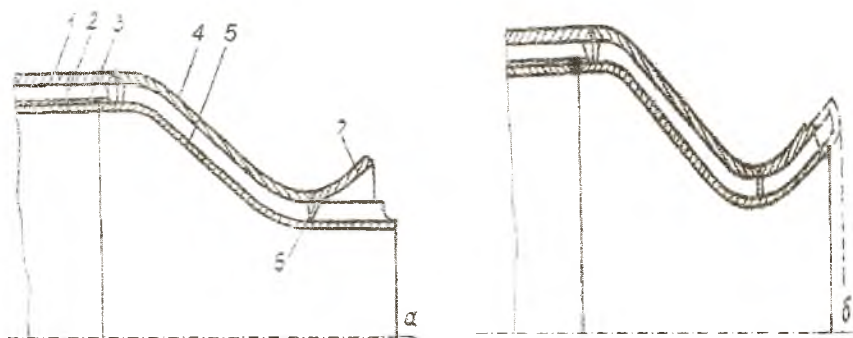


Рис. 16. Положение деталей рубашки и стенки средней части корпуса камеры до (а) и после (б) развальцовки цилиндрического участка стенки: 1, 2, 3 – рубашка, гофрированная проставка и стенка цилиндрического участка корпуса; 4, 5 – рубашка и стенка входной части сопла, 6 – кольцевая проточка в ребрах; 7 – рубашка начального участка расширяющейся части сопла

У стыка со смесительной головкой на корпусе могут быть установлены штуцеры для измерения давления газа в камере сгорания и для крепления воспламенителя. Штуцер вставляют в отверстия рубашки и стенки и приваривают. Чтобы обеспечить проход охлаждающего по каналам тракта охлаждения, перекрытым штуцером, ребра или гофры вокруг него необходимо удалить (рис. 17).

Пояс завесного охлаждения обычно устанавливают на входе в сопло. В зависимости от конструкции [2, 3] его приваривают к деталям стенки и рубашки или изготавливают за одно целое со стенкой.

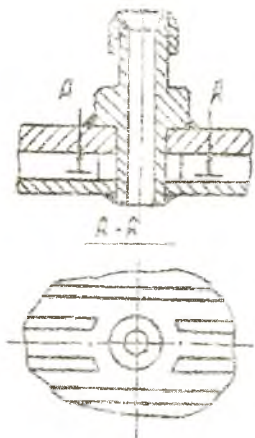


Рис. 17. Установка штуцера измерения давления газа в камере сгорания на цилиндрическом участке корпуса

Собранную среднюю часть корпуса помещают в печь. После найки и остывания с печью сборочная единица проходит технологические испытания на прочность, герметичность, а затем обточку торцов под соединения с другими сборочными единицами.

Аналогичным образом изготавливают и вторую сборочную единицу – *расширяющую часть сопла*.

При большой степени расширения сопла для снижения веса вместо гладкой рубашки иногда устанавливают тонкую гофрированную рубашку (рис. 18), которую сваривают с остальными деталями по отбортовкам на концах. Недостатком такой конструкции является возможность повреждения рубашки при незначительных ударах.

Обычно рубашку расширяющейся части сопла делают из нескольких деталей со ступенчатым уменьшением ее толщины к срезу сопла. При сборке деталей рубашки в нее вваривают распределительные кольца коллекторов для ввода охладителя в тракт охлаждения камеры или вывода его из тракта, снаружи приваривают узлы крепления агрегатов и трубопроводов двигателя, а также узлы крепления камеры к ЛА.

На рубашке расширяющейся части сопла часто устанавливают кольцо для крепления донного экрана ЛА, предохраняющего агрегаты двигателя от перегрева излучением выходящей газовой струи. Для повышения устойчивости формы сопла при работе его с перерасширением газа к рубашке приваривают кольцевые ребра жесткости.

К торцам стенки и рубашки у среза сопла для повышения жесткости приваривают замыкающее кольцо (рис. 18, поз.7). К этому кольцу или рядом к рубашке иногда приваривают штуцер для слива жидкости из тракта охлаждения камеры при ее испытаниях или после отложенного запуска.

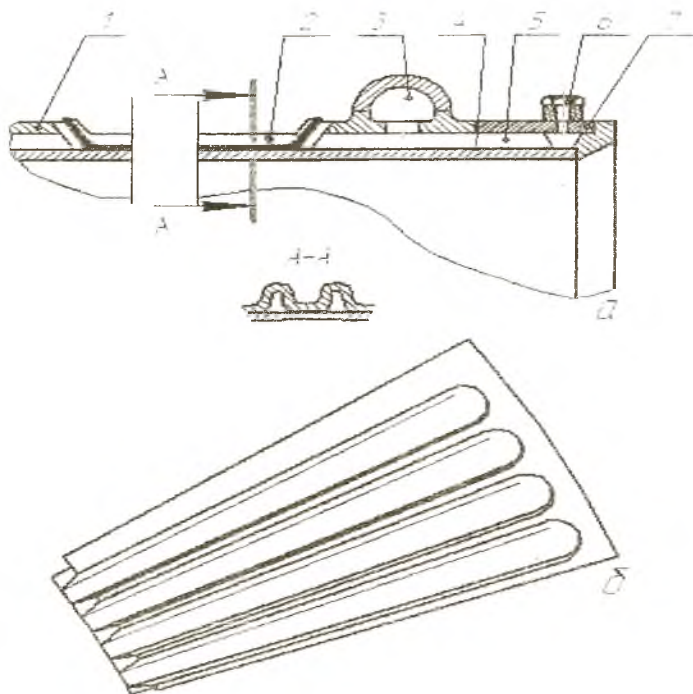


Рис.18. Схема соединения гофрированной рубашки со стенкой и другими деталями: 1 – рубашка предшествующей части сопла; 2 – гофрированная рубашка; 3 – коллектор; 4 – стенка; 5 – гофрированная проставка; 6 – пробка штуцера; 7 – замыкающее кольцо

Для камер двигателей последних ступеней ракет и космических ЛА используют одностенные сопловые насадки [3], соединяемые с охлаждаемой регенеративно частью сопла сваркой или с помощью фланцевого соединения.

Для усиления теплозащиты насадка в этом месте часто располагают пояс завесы (рис. 19).

Основные технические требования на изготовление корпуса приведены в пособии [3]. Ниже даны некоторые числовые значения допусков на размеры и погрешности формы для одной из камер двигателя средней тяги:

толщина стенки, мм $-(0,1 \dots 0,15);$

толщина ребра, мм	$\pm(0,1...0,15)$;
высота ребра, мм	$\pm(0,15...0,20)$;
шаг ребра, мм	$\pm 0,15$;
диаметр критического сечения сопла –	по 10, 11 квалитетам;
диаметр среза сопла –	по 13-16 квалитетам.

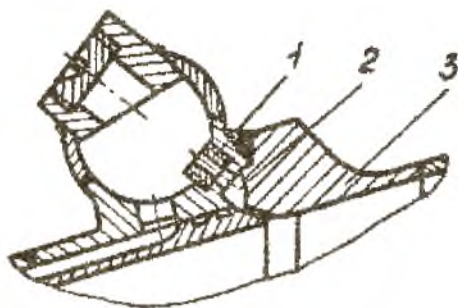


Рис.19. Пояс завесы на стыке охлаждаемой регенеративно и одностенной частей сопла: 1 – жиклёр для заданного расхода охладителя на завесу; 2 – коллектор завесы; 3 – переходное кольцо одностенного насадка

3.2.3. Сборка камеры

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

Её устанавливают на оправке с горизонтальной осью. На такой же оправке устанавливают среднюю часть камеры и, совместив торцы сборочных единиц, сваривают стенки встык, а рубашки – с помощью соединительных колец.

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.

Плоскости торцов соединительного и переходных колец должны быть перпендикулярны оси камеры, иначе соединительное кольцо нельзя будет вставить (рис.20,а). Продольные швы между концами соединительных полуколец необходимо варить с подкладкой (рис. 20,б).

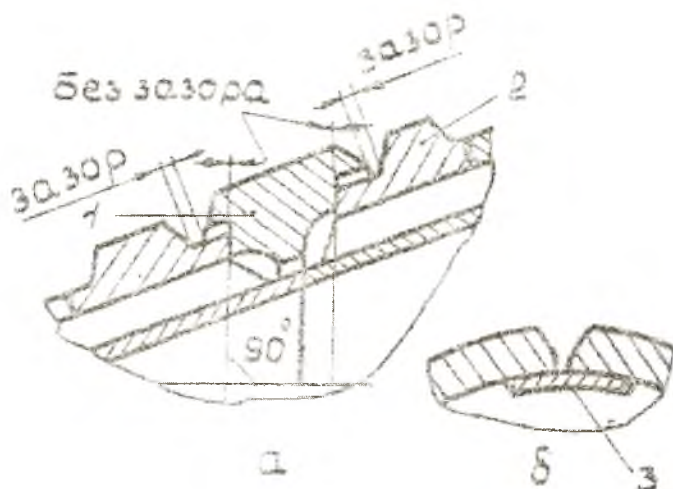


Рис. 20. Установка соединительного кольца при сварке секций рубашки корпуса камеры (а) и схема установки подкладки при сварке разъемов этого кольца (б): 1 – разъемное соединительное кольцо; 2 – переходное кольцо рубашки; 3 – подкладка колец (разъемных или сплошных), привариваемых к переходным кольцам

Подобным же образом присоединяют к корпусу смесительную головку.

Иногда необходимо установить коллектор на выходе из тракта охлаждения корпуса. В этом случае можно использовать решение, приведенное на рис.21.

Опоры крепления камеры к ЛА, если они не были ранее присоединены к головке или корпусу камеры, привариваются в специальном стапеле. Положение их относительно оси сопла должно быть задано с определённой точностью. Поэтому после приварки часто их опорные поверхности приходится дополнительно обрабатывать.

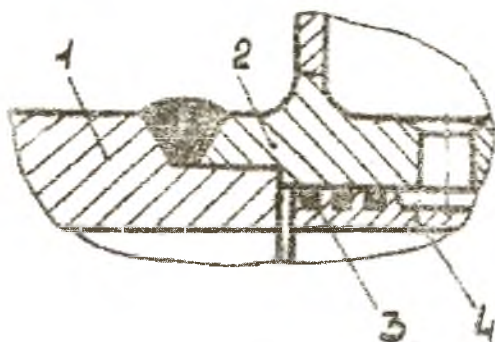


Рис.21. Соединение головки с корпусом камеры при установке коллектора для вывода охладителя: 1 – корпус головки; 2 – корпус коллектора; 3 – припой; 4 – стенка корпуса камеры

Наконец, камеру промывают, сушат, клеймят, заглушают все отверстия, конрят резьбовые соединения, а перед постановкой заглушки в критическом сечении сопла внутри камеры сгорания закладывают мешочек с силикагелем (осушителем).

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 внахлёт.

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.

Технические условия на сборку камеры (приведены в пособии [3])

Некоторые числовые значения, характеризующие допуски на размеры и взаимное положение деталей для одной из камер, приведены ниже:

- несоосность осей сборочных единиц – до 0,5 мм;
- зазор между торцами стенок перед сваркой – до 0,1 мм;
- непараллельность осей сборочных единиц на длине 100 мм – до 0,05 мм;
- смещение центров отверстий в кронштейнах регулируемых креплений относительно номинального положения – не более 1 мм;
- то же смещение в кронштейнах нерегулируемых креплений – не более 0,05 мм;
- неперпендикулярность торцов кронштейнов оси камеры на длине 100 мм – не более 0,05 мм;

Для поворотных камер:

- неперпендикулярность осей цапф оси камеры на длине 100 мм – не более 0,05 мм;
- несоосность осей цапф – не более 0,1 мм;
- непересечение осей цапф с осью камеры – не более 0,1 мм.

3.3. Расчет прочности элементов камеры

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

сведения по прочностным характеристикам материалов, используемых в камерах, приведены в приложениях 1 и 2.

Общие вопросы прочности элементов камеры двигателя и методики их расчетов приведены в пособии [1,3]. Следует помнить, что прочностные расчеты делят на проектировочные и поверочные. Поверочные расчеты проводят в том случае, если размеры деталей заданы или назначены исходя из каких-либо соображений. При проектировочном расчете задаются рекомендованным коэффициентом запаса прочности и определяют необходимые размеры детали.

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

1. Расчет прочности смесительной головки, который включает в себя расчет прочности блока днищ и наружного днища (или газоведа).
2. Расчет общей прочности корпуса камеры.
3. Расчет местной прочности стенки корпуса в местах соединения его сборочных единиц.
4. Расчет прочности опор крепления камеры.

Расчет прочности смесительной головки проводится по методике, изложенной в пособии [1]. Ниже рассматривается расчет общей прочности корпуса камеры и некоторые случаи расчета других элементов.

3.3.1. Расчет общей прочности корпуса

Расчет общей прочности на ЭВМ

Расчет общей прочности корпуса проводится на ЭВМ по программе COPLOS, затем, используя полученные результаты, необходимо проверить прочность корпуса в заданных преподавателем сечениях вручную. В программе COPLOS по заданным параметрам рабочего процесса и геометрии сопла вначале определяется распределение давления газа по длине сопла, затем осевой силы и, наконец, значений погонных усилий, действующих в стенках сопла, N_x – меридионального и N_y – окружного. В одностенном корпусе эти усилия приложены к нейтральной поверхности оболочки, в двухстенном корпусе за нейтральную поверхность можно принять поверхность спая вершин ребер (гофров) с рубашкой.

При выполнении программы также рассчитываются для заданного материала рубашки приближённые значения её толщины.

Приближённость этого расчета обусловлена тем, что:

1) принимается постоянная температура стенки и рубашки по длине сопла;

2) предполагается, что материал стенки идеально пластичен, стенка работает на сжатие и напряжения в ней достигли предела текучести;

3) не учитывается прочность связей.

Для проведения расчета необходимы следующие данные:

Геометрические размеры контура газового тракта (см. рис. 3), которые могут быть взяты из расчета OXLADA, так как в этой программе, как и в COPLOS, используется один и тот же алгоритм математического описания профиля сопла. Однако в последнем случае не требуется длина камеры (размер X6 не запрашивается).

Число участков N, на которое следует разбить контур сопла поперечными сечениями, следует оставить таким же, как при расчете охлаждения. Тогда положение расчетных сечений в обоих расчетах будут совпадать.

Из OXLADA также могут быть взяты:

PK – давление газа в камере, МПа;

K – показатель изэнтропы расширения газа в сопле.

Дополнительно вводятся:

BETA – угол наклона профиля выходного сечения сопла к его оси, град (при профилировании сопла – β_A);

h1 – толщина стенки сопла, м;

t – высота щели охлаждающего тракта, м;

PA – давление газа на срезе сопла, МПа;

PH – давление окружающей среды, МПа;

PG – среднее по длине тракта давление охладителя, МПа;

P – заданная тяга камеры, кН;

Sig1 – предел текучести материала стенки, МПа;

Sig2 – предел текучести материала рубашки, МПа;

nt – коэффициент запаса прочности.

Значения параметров h1, t, PG, Sig1, Sig2 и nt принимаются постоянными по длине сопла. Рекомендуется назначать их величину,

равной значениям в критическом сечении. Величины Sig1 и Sig2 определяются по средней температуре стенки и рубашки. Для рубашки эту температуру принимают равной температуре охладителя.

Результаты расчета выдаются в виде таблицы на экране дисплея, и по решению расчетчика распечатываются.

Расчетная таблица содержит следующие столбцы:

I – номер сечения;

X, Y – координаты точек профиля, м;

GAMMA – угол между касательной к контуру сопла и его осью, град;

RM и RN – меридиональный и нормальный радиусы кривизны сопла, м;

p – давление газа, МПа;

p1= p – PH – перепад давления, действующий на стенку сопла, МПа;

POS – осевая сила, приложенная в сечениях двухстенной оболочки, кН;

NX, NY и NE – меридиональная, окружная и эквивалентная внутренние погонные силы в сечениях двухстенной оболочки, кН/м;

h2 – толщина рубашки, мм.

В рассматриваемом расчете эквивалентное погонное усилие определяется из выражения

$$NE = \sqrt{NX^2 + NY^2} - NX \cdot NY, \quad (14)$$

а толщина рубашки

$$H2 = \frac{nt \cdot NE - Sig1 \cdot h1}{Sig2}. \quad (15)$$

В конце таблицы приводится значение тяги PQ, полученное из расчета осевой силы, и погрешность её определения W по сравнению с заданной P.

Эта погрешность является следствием как аппроксимации отдельных величин, так и неточности расчета размеров сопла в “Курсе раб. по ТРД”.

Величины POS, NX, NY и NE, рассчитанные в сечении на входе в сопло (с абсциссой X5), остаются постоянными в цилиндри-

ческой части камеры до сечения, в котором расположены опоры крепления камеры.

На основании расчета принимается предварительная толщина рубашки в цилиндрической части камеры, равной h_2 в сечении X5. Эту же толщину рубашки рекомендуется оставить постоянной до разъема в критическом сечении. За разъемом толщину рубашки следует уменьшить до значения h_2 в этом месте. Часто в расширяющейся части сопла получается значительный участок с $h_2 = 0$. Это означает, что на этом участке прочность сопла от действия газовых сил может быть обеспечена одной стенкой.

По результатам расчета необходимо построить графики изменения POS, NX и NY по длине камеры с учетом расположения опор.

Геометрические характеристики сечений и силы NX, NY, NE могут быть использованы в последующих уточненных расчетах.

Уточненный расчет прочности в заданных сечениях корпуса

В этом расчете в цилиндрической и сужающейся частях корпуса с бронзовой стенкой можно принимать расчетную схему, в которой предполагается, что стенка работает на сжатие в пластической области деформаций. Тогда толщина рубашки определяется выражениями (14) и (15). Уточнение заключается в учете действительных температур стенки и рубашки при выборе пределов текучести в расчетных сечениях. Следует помнить, что наибольшее значение усилия NE принимает на участке от места расположения опор крепления до сечения на входе в сопло.

На графиках NY, NE = f(x) в районе сужающейся части сопла наблюдаются скачкообразные изменения величины погонных усилий в местах перемены радиусов кривизны оболочки и перехода осевой силы через 0. Эти места целесообразно дополнительно проверить на прочность.

Рассмотренная методика может быть использована для расчета толщины сварных швов соединительного кольца с корпусом и смесительной головкой. Однако запас прочности по шву должен быть выше запаса прочности по основному материалу. При сварке стыковым швом можно считать $\sigma_{ВШ} = 0,9 \sigma_{ВМ}$. Коэффициент запаса прочности должен быть $n_{ВШ} = 3 \dots 5$.

В расширяющейся части сопла на некотором участке стенки может работать в упругой области деформаций. В этом случае погонные усилия распределяются между стенкой и рубашкой в соответствии с их жесткостью (влиянием связей на прочность и жесткость корпуса можно пренебречь), а напряжения в них определяются выражениями [1]:

$$\text{в стенке} \quad \sigma_x' = \frac{c'}{c} \frac{N_x}{h'} - \frac{c''}{c} E' \frac{\Delta \varepsilon_t}{1-\mu}; \quad (16)$$

$$\sigma_y' = \frac{c'}{c} \frac{N_y}{h'} - \frac{c''}{c} E' \frac{\Delta \varepsilon_t}{1-\mu};$$

$$\text{в рубашке} \quad \sigma_x'' = \frac{c''}{c} \frac{N_x}{h''} + \frac{c'}{c} E'' \frac{\Delta \varepsilon_t}{1-\mu}; \quad (17)$$

$$\sigma_y'' = \frac{c''}{c} \frac{N_y}{h''} + \frac{c'}{c} E'' \frac{\Delta \varepsilon_t}{1-\mu};$$

где $c' = E' h'$, $c'' = E'' h''$, $c = c' + c''$ – погонные жесткости стенки, рубашки и корпуса в целом;

E' , E'' – модули упругости материалов стенки и рубашки с учетом их температуры;

h' , h'' – толщины стенки и рубашки в рассматриваемом сечении;

μ – коэффициент Пуассона;

$\Delta \varepsilon_t = \alpha' \Delta T' - \alpha'' \Delta T''$ – разность свободных температурных деформаций стенки и рубашки;

α' , α'' – коэффициенты линейного расширения материалов стенки и рубашки;

$\Delta T'$, $\Delta T''$ – температура нагрева стенки и рубашки по отношению к начальной.

Результаты расчета позволяют найти эквивалентные напряжения, коэффициенты запаса прочности стенки и рубашки и сделать соответствующие выводы.

При большой разнице температур стенки и рубашки в расширяющейся части сопла (например, в водородных камерах) температурные напряжения в стенке могут значительно превосходить предел текучести материала. В этом случае расчет прочности должен проводиться методом переменных параметров упругости, который рассматривается ниже [1,7]. Приближённая оценка прочности в этом случае может быть сделана, как и в камере сгорания, принимая допущение о том, что стенка выполнена из идеально пластичного материала.

В уточнённом расчете также следует определить радиальное погонное усилие, действующее на связи, и проверить прочность связей и пайки.

$$Q_C = \left(\frac{\sigma_x' h'}{RM} + \frac{\sigma_y' h'}{RN} \right) s_p + p_x b_p,$$

где s_p – шаг ребер; b_p – расстояние между ребрами.

Знак Q_C говорит о растяжении ($Q_C > 0$) или о сжатии ($Q_C < 0$) связей.

Расчет корпуса при работе материала в упругопластической области деформаций

Расчет по формулам (16) и (17) предполагает, что напряжения в материале стенок корпуса меньше предела упругости σ_y . В практических расчетах обычно используют вместо σ_y предел текучести σ_T , значение которого чаще приводится в справочниках.

Формулы (16) и (17) можно применить и для расчета в упругопластической области, если использовать метод переменных параметров упругости и учесть зависимость механических свойств материала от температуры. Для этого необходимо иметь диаграммы деформирования материала стенки и рубашки при рабочей температуре.

Если при расчете прочности корпуса в упругой области какие-либо из напряжений σ_x^I , σ_y^I , σ_x^{II} или σ_y^{II} превышают предел текучести материала, то необходимо найти интенсивности напряжений в стенках:

$$\sigma_{i(1)}' = \sqrt{(\sigma_{x(1)}')^2 - \sigma_{x(1)}' \cdot \sigma_{y(1)}' + (\sigma_{y(1)}')^2}, \quad (18)$$

$$\sigma_{i(1)}'' = \sqrt{(\sigma_{x(1)}'')^2 - \sigma_{x(1)}'' \cdot \sigma_{y(1)}'' + (\sigma_{y(1)}'')^2}. \quad (19)$$

Здесь индекс в скобке означает номер приближения.

Если $\sigma_{i(1)}' < \sigma_T'$ и $\sigma_{i(1)}'' < \sigma_T''$, то материал работает в упругой области деформаций и расчет закончен.

Если одно из неравенств не выполняется, то необходимо вести расчет методом переменных параметров упругости. При этом напряжения, полученные при расчете стенок в упругой области, могут быть приняты в качестве первого приближения.

Пусть интенсивность напряжений в стенке $\sigma_{i(1)}' > \sigma_T'$, а рубашка работает в упругой области деформаций. На диаграмме деформирования материала стенки (рис.22) точка A_1 , соответствующая напряжению $\sigma_{i(1)}'$, будет лежать на продолжении начального линейного отрезка диаграммы. Интенсивность деформации в точке A_1 равна

$$\varepsilon_{i(1)}' = \frac{\sigma_{i(1)}'}{E'}.$$

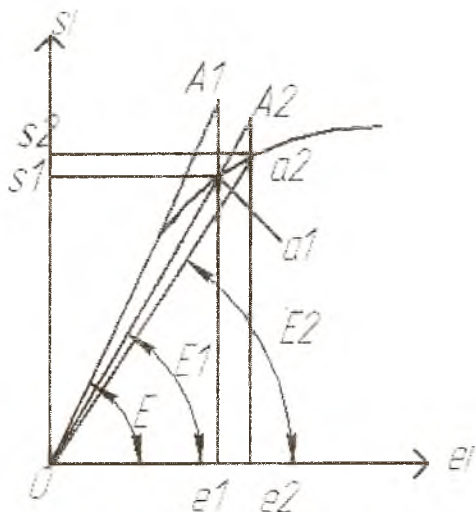


Рис.22. Определение секущих модулей упругости

Из диаграммы деформирования следует, что при такой деформации в материале стенки может быть только напряжение $\sigma_{(1)}$, определяемое точкой a_1 .

Тангенс угла между прямой $0a_1$ и осью абсцисс называют секущим модулем упругости.

В данном случае он равен

$$E_{C(1)}' = \frac{\sigma_{(1)}'}{\varepsilon_{i(1)}'} \quad (20)$$

На рис. 22: по оси абсцисс $\varepsilon_i = \varepsilon_i$, по оси ординат $\sigma_i = \sigma_i$; обозначения углов соответствуют модулям упругости: $E = E'$, $E_1 = E_{C(1)}$, $E_2 = E_{C(2)}$.

Теперь, используя $E_{C(1)}'$ вместо E' , и учитывая, что при пластической деформации коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$, по формулам (16) и (17) найдем новые напряжения (второго приближения) в оболочках $\sigma_{x(2)}'$, $\sigma_{y(2)}'$, $\sigma_{x(2)}''$, $\sigma_{y(2)}''$ и по (18) интенсивность $\sigma_{i(2)}'$.

Откладывая эту интенсивность на продолжении прямой $0a_1$, получим точку A_2 . Этой точке на диаграмме деформирования соответствует напряжение $\sigma_{(2)}$ (точка a_2) и деформация $\varepsilon_{i(2)}$. Если окажется, что точка A_2 лежит на диаграмме деформирования, то расчет закончен.

В противном случае необходимо третье приближение. Для этого находим значение секущего модуля второго приближения $E_{C(2)}'$ (аналогично (20)) и с этим модулем при $\mu = 0,5$ по формулам (3) и (4) определяем напряжения третьего приближения. Расчет ведётся до тех пор, пока расчетная интенсивность напряжений σ_i' с заданной точностью не совпадёт со значением, определяемым диаграммой деформирования.

Если стенка находится в области пластических деформаций, рубашка должна работать при упругих деформациях с коэффициентом запаса $n = 1,5 \dots 2,5$.

3.3.2. Расчет местной прочности

В курсовом проекте расчет местной прочности стенки проводится в местах соединения сборочных единиц корпуса по методи-

кам, изложенным в пособии [1]. При расчете местной прочности также рассчитывают прочность крепления камеры.

Расчет прочности опор крепления

Опоры крепления выполняются в виде кронштейнов или цапф на боковой поверхности корпуса или в виде специальных силовых элементов на смесительной головке. В большинстве случаев они присоединяются к камере сваркой и требуется проверить на прочность сварные швы. Кроме того, может оказаться необходимым провести оценку прочности опор и в других опасных сечениях.

Для приварки опор часто используется угловой шов (рис. 23,а). Основной размерной характеристикой угловых швов является расчетный катет K . Величина его принимается равной толщине более тонкого из соединяемых элементов, и не должна превышать [13] $K = 2 + 0,4 h_m$, мм, где h_m – толщина более тонкого элемента.

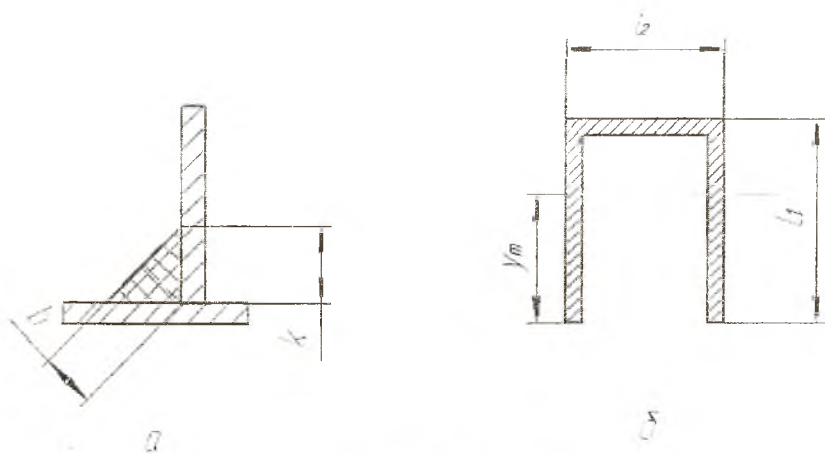


Рис.23. Угловой сварной шов (а) и расположение шва по контуру опоры (б)

Расчет прочности угловых швов всех типов проводится по сечению, проходящему через биссектрису прямого угла. Ширина этого сечения принимается равной $b = 0,7 K$, а момент сопротивления изгибу $W_{ш} = 0,7 W$, где W – момент сопротивления изгибу сечения швов по контуру привариваемого элемента.

Следует также иметь в виду, что при сварке деталей из разных марок стали прочность сварного шва будет определяться прочностными характеристиками менее прочного материала, например, прочностью рубашки камеры.

В учебном пособии [1] приводится расчет прочности опоры, у которой сварные швы в плане образуют замкнутый прямоугольник. Более широкое распространение получили опоры швеллерного сечения, которые по контуру привариваются к рубашке.

При этом сварной шов в плане имеет П-образный вид (рис.23,б), а момент сопротивления его изгибу равен

$$W \approx \frac{bl_1^2}{12} \cdot \frac{8l_1^2 + 20l_1l_2 + 5l_2^2}{2l_1^2 + 3l_1l_2 + l_2^2}, \text{ м}^3.$$

Все обозначения в этой формуле пояснены на рисунке.

Опоры крепления, расположенные на смесительной головке, часто представляют собой коробчатые конструкции, приваренные к наружному днищу или газоводу. Например, представленное на рис. 24 крепление двигателя состоит из трёх опор: 1, 2 и 3. Величина усилия, приходящаяся на каждую из опор, будет зависеть от расстояния центра опоры от оси камеры. На опору 1 действует усилие

$$P_1 = P \cdot l_1 / (l_1 + l_2),$$

на опоры 2 и 3 –

$$P_2 = P_3 = 0,5P l_2 / (l_1 + l_2).$$

Здесь P – тяга камеры, размеры l_1 и l_2 показаны на рисунке.

Так как опоры приварены к криволинейной поверхности, то в сварных швах могут возникать помимо сжатия деформации изгиба и среза. Наиболее сложную деформацию испытывает опора 1, в которой сварной шов подвергается изгибу моментом

$$M = P_1 a,$$

где a – расстояние от центра опоры до нейтральной линии сечения сварного шва.

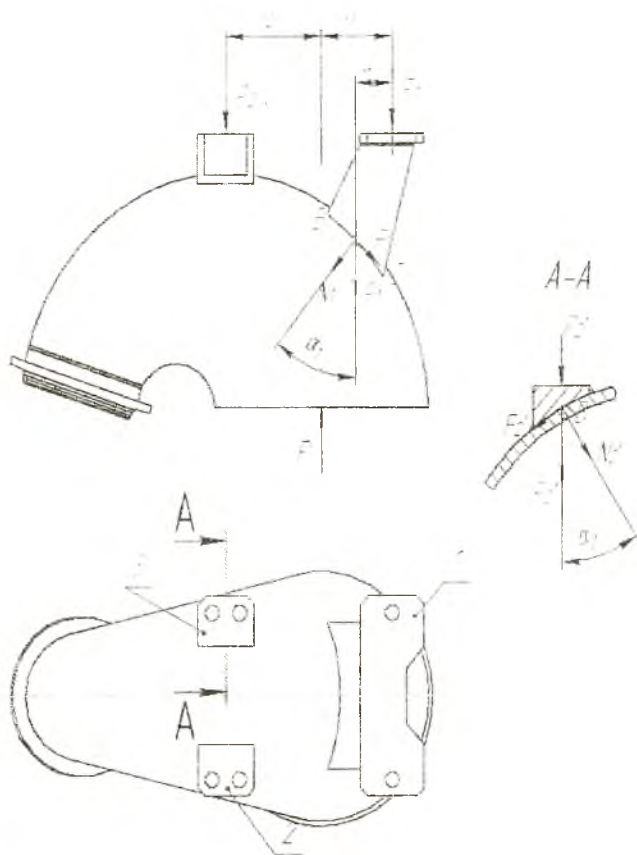


Рис. 24. Пример расположения опор крепления камеры на головке

Напряжения изгиба равны

$$\sigma_{\text{из}} = \pm M / W,$$

где W – момент сопротивления изгибу сварного шва.

При этом напряжения сжатия

$$\sigma_{\text{сж}} = - N_1 / S,$$

где $N_1 = P_1 \sin \alpha$;

S – площадь основания опоры, включая сварной шов;

α – угол между касательной к поверхности наружного днища и осью камеры.

В результате сложения напряжений сжатия и изгиба получим: нормальные напряжения в точке В

$$\sigma_B = \sigma_{сж} - \sigma_{из}$$

нормальные напряжения в точке С

$$\sigma_C = -\sigma_{сж} - \sigma_{из}$$

Одновременно в шве возникают напряжения среза

$$\tau = F_1 S_{ср},$$

где $F_1 = P_1 \cos \alpha$, S – площадь среза для сварного шва.

Эквивалентные напряжения можно определить по формуле

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2},$$

и максимальными они будут в точке С.

По конструкции опоры камеры значительно различаются. При расчете на прочность эти различия должны учитываться обоснованным выбором расчетной схемы.

Кроме рассмотренных расчетов студенту может быть задано рассчитать на прочность коллекторы, фланцевые соединения и другие элементы камеры, а также рассчитать запас устойчивости формы сопла при работе его с перерасширением газа. Такой расчет может быть необходим для двигателей верхних ступеней ракеты при испытании их в наземных условиях.

Расчетная схема при расчете устойчивости формы сопла

В этом расчете может быть принята расчетная схема, показанная на рис.25.

Длина участка сопла L , испытывающего сжатие атмосферным давлением, отсчитывается от жесткого коллектора до сечения e , в котором давления газа и атмосферы равны $p_{ге} = p_a$. Среднее давление газа на этом участке равно

$$p_{гср} = (p_{ге} + p_a)/2,$$

где p_a – давление газа у коллектора (в данном случае на срезе сопла).

Тогда перепад давления, сжимающий оболочку, равен

$$\Delta p_H = p_H - p_{гср}$$

Дальнейший расчет ведётся по методике, изложенной в [1].

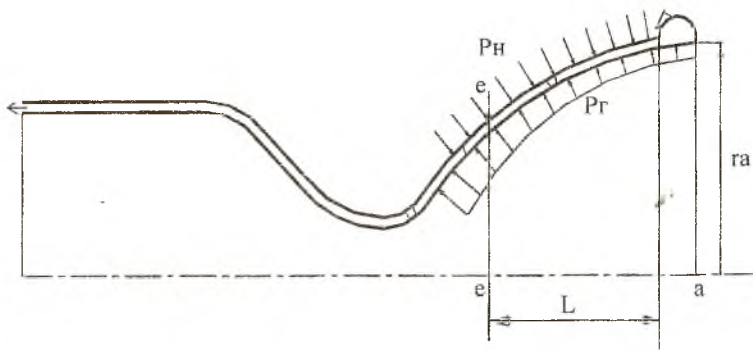


Рис. 25. Расчетная схема при расчете устойчивости формы расширяющейся части сопла

Замечания:

1. Следует иметь в виду, что назначенные или полученные при проектировочном расчете размеры (толщины, диаметры и т.д.) должны соответствовать *сортаменту* (стандартным размерам и форме) выпускаемых промышленных материалов, для чего необходимо пользоваться соответствующими справочниками (например, [9] или приложением 3).

2. При выполнении однотипных расчетов результаты необходимо сводить в таблицы. После каждого расчета необходимо сделать анализ результатов и вывод.

4. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

При выполнении курсового проекта необходимо:

- разработать принципиальную схему ДУ, составить циклограмму её работы при запуске и останове и функциональные схемы управления и регулирования на основных режимах работы;
- разработать компоновочную схему двигателя;
- спроектировать систему теплозащиты элементов камеры;
- произвести конструктивную разработку камеры;
- выбрать материалы для изготовления элементов камеры и рассчитать на прочность эти элементы;
- выбрать технологию изготовления деталей камеры, порядок её сборки и испытаний;
- вычертить сборочный чертёж камеры и назначить технологические требования на её сборку и испытания;
- начертить рабочий чертёж детали (обычно форсунки);
- выполнить по указанию преподавателя специальное задание;
- оформить пояснительную записку к проекту.

Графическая часть

Конструкторская компоновка камеры выполняется на компьютере с использованием одного из графических редакторов и должна иметь объём, соответствующий 3...4 листам ватмана формата А1.

Проектирование можно вести, не используя какой-либо конкретный прототип. В этом случае вначале вычерчивают газодинамический контур камеры, а затем последовательно разрабатывают конструкцию смесительной головки, корпуса камеры и других элементов (см. раздел 3.2.2.). Выбирая те или иные конструктивные решения, необходимо продумать обоснование их применения с учётом простоты изготовления.

В основу конструкции камеры может быть взят прототип – чертеж камеры известного двигателя. В этом случае необходимо согласовать с консультантом, какие изменения в конструкцию будут внесены при проектировании.

Разработка чертежа камеры ведётся по частям. Разработав конструкцию какого-либо элемента, надо обсудить её с консультантом и после его одобрения решать следующую задачу. Для этого необходимо на консультацию приносить на дискете или в распечатанном виде промежуточные результаты конструирования.

Студент разрабатывает сборочный чертеж камеры – документ, на основании которого будет выполняться окончательная сборка камеры из сборочных единиц и необходимых для сборки 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.

Однако, исходя из учебных целей, на сборочном чертеже должны быть проработаны все конструктивные элементы сборочных единиц. На чертеже необходимо представить вид камеры сбоку с продольным разрезом верхней половины (при этом головка должна находиться слева, сопло обращено направо) и вид на неё со стороны головки (для показа угловой координации элементов конструкции).

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.

При выполнении компоновки камеры прорабатывают вопросы технологии изготовления её деталей, последовательность сборки и испытаний.

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 резьбы;

- 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.

Конкретные примеры требований приведены в приложении 11.

На отдельном листе А4 выполняют спецификацию сборочного чертежа по ГОСТ 2.108-68.

После утверждения компоновочного чертежа консультантом студент распечатывает его, подписывает и представляет на подпись консультанту.

Требования к объёму чертежа указаны выше. При больших размерах камеры допускаются:

- сдвиг осевой линии камеры вниз от линии симметрии чертежного листа с частичным обрывом нижней части сопла;

- вырывы по длине камеры на участках, где нет изменений в её конструкции;
- изображение вида со стороны головки не в проекционной связи и в меньшем масштабе (1:2);
- совмещение части вида со стороны головки с частью вида со стороны огневой полости камеры;
- выполнение вынесенных элементов в увеличенном масштабе (2:1, 5:1).

Пояснительная записка

Выполняется на компьютере в WORD, объём её вместе с рисунками и приложением – 25...40 листов бумаги формата А4.

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 работой [16].

Основная часть записки должна иметь *следующие разделы*:

Введение (требования к проектируемой ДУ).

1. Функциональное проектирование (принципиальная схема ДУ, циклограмма запуска-останова).

2. Компонентная схема двигателя. Расчет проходных сечений патрубков, подводящих компоненты.

3. Конструкция камеры (описание конструкции: состав камеры, способы соединения её частей, крепление камеры, зажигание компонентов, назначение штуцеров и др.).

4. Расчет теплозащиты элементов камеры.

4.1. Выбор системы теплозащиты элементов камеры и вида охладителя.

4.2. Расчет проточного охлаждения камеры (подготовка данных для расчета проточного охлаждения на ЭВМ, результаты расчета).

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. Расчет прочности элементов камеры.
- 5.1. Расчет прочности смесительной головки.
- 5.1.1. Расчет прочности блока днищ.
- 5.1.2. Расчет прочности наружного днища (или газоведа).
- 5.2. Расчет прочности корпуса.
- 5.2.1. Расчет общей прочности корпуса (анализ результатов расчета на ЭВМ, расчет прочности в заданных сечениях).
- 5.2.2. Расчет местной прочности корпуса (прочность неподкреплённых участков, связей стенок и пр.).
- 5.2.3. 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. Специальное задание (только по указанию преподавателя).

Заключение (итоги проектирования и предложения).

В заключении необходимо сравнить параметры разработанного ЖРД уже выполненных двигателей (приложение 12) и сделать соответствующие выводы.

Список использованных источников.

Приложения:

1. Результаты расчета проточного охлаждения камеры на ЭВМ.
2. Результаты расчета общей прочности на ЭВМ.
3. Рабочий чертёж детали (форсунки).
4. Спецификация камеры.
5. Сборочный чертёж камеры (прилагается к пояснительной записке).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате конструирования камеры двигателя, как и любого другого изделия, технические замыслы и теоретические расчеты предстают в виде графической документации, используя которую можно изготовить изделие и использовать его по назначению.

Конструкторская документация является средством, с помощью которого конструктор выражает свои творческие мысли и доводит их до изготовителей машин.

В настоящее время конструирование производится с использованием компьютерных технологий. Поскольку реальные детали машин представляют собой объёмные тела, глубокую проработку их конструкции можно выполнить только при пространственном конструировании, которое осуществляется применением пакетов программ 3D.

Конструирование в объёме приводит к уменьшению конструкторских ошибок и позволяет проводить прочностные расчеты с использованием современных программных пакетов. При этом имеется возможность вносить изменения в конструкцию и быстро передавать информацию в производство. Несомненно, работа в пакетах 3D развивает пространственное воображение. Поэтому будущие конструкторы должны ставить своей целью освоение объёмного конструирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пичугин, Д.Ф. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие / Д.Ф. Пичугин; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 244 с.
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 ред. Г.Г. Гахуна. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
3. Пичугин, Д.Ф. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие / Д.Ф. Пичугин, Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 244 с.
4. Борисов, В.А. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие / В.А. Борисов, Д.Ф. Пичугин; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1993. 95 с.
5. Козлов, А.А. 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.
6. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / под ред. В.П. Глушко; АН СССР. М., 1971
7. Бережинский, Р.А. Основы проектирования камер сгорания ЖРД: учеб. пособие / Р.А. Бережинский, В.Д. Горохов, В.А. Коробченко; под общ. ред. В.С. Рачука. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 129с.
8. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Учебник для вузов / под ред. В.М. Кудрявцева; изд. 2. М.: Высш. шк., 1975.
9. Справочные материалы к курсовому и дипломному проектированию ДЛА / сост. Д.Ф. Пичугин; Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992.
10. Атлас конструкций ЖРД. Ч.1. / под ред. Г.Г. Гахуна. М. : Изд-во МАИ, 1969.
11. Атлас конструкций ЖРД (Описания). Ч.1 / под ред. Г.Г. Гахуна. М.: Изд-во МАИ, 1969.

12. Выбор материалов для деталей ДЛА: метод. указания к курс. и дипл. проектированию (с приложением) / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1984.
13. Орлов, П.И. Основы конструирования. Кн.2 / П.И. Орлов. М.: Машиностроение, 1972. 525с.
14. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1. / В.И. Анурьев. М.: Машиностроение, 1978. 728 с.
15. Губин, А.И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов / А.И. Губин. М.: Машиностроение, 1964.
16. 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.
17. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов втузов /В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегаллин, А.П Тишин; под ред. В. П. Глушко. М.:Машиностроение,1989. 464с.
18. Феодосьев, В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев; 5-е изд. М.: Наука,1970. 544 с.

Пример оформления функциональной схемы системы управления

На функциональной схеме [1] изображают агрегаты, обеспечивающие работу системы, связи между ними и характер взаимодействия агрегатов.

В качестве примера на рисунке показаны функциональная схема системы одновременного опорожнения баков (СОБ) и системы регулирования тяги ДУ, изображённой на рис. П1.1.

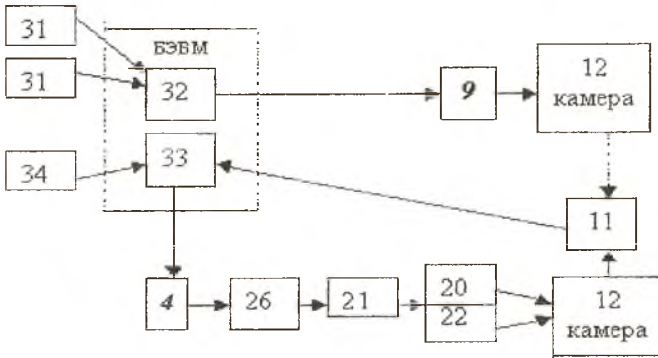


Рис. П1.1. Функциональная схема системы управления

Схема СОБ читается следующим образом. Сигналы уровнемеров 31 поступают в бортовой ЭВМ (БЭВМ) в блок 32. После сравнения текущих значений с программными и обнаружения отклонения от задания блок 32 вырабатывает команду дросселю 9 системы СОБ, который изменяет расход одного из компонентов (в данном случае окислителя) в камеру 12. В результате этого опорожнение баков происходит в соответствии с программой, но тяга камеры может выйти за пределы допуска. В этом случае начинает работать система регулирования тяги. Датчик давления в камере 11 непрерывно посылает сигналы в блок БЭВМ 33. Если значение давления (значит и тяги) выходит за пределы допуска, то блок 33 вырабатывает команду в регулятор расхода 4, который изменяет расход окислителя в ЖГТ 26. В результате этого изменяются обороты турбины 21 и насосов 20, 22, меняется расход топлива в камеру 12 и восстанавливаются значения давления и тяги.

Модели агрегатов ЖРД для выполнения компоновочной схемы

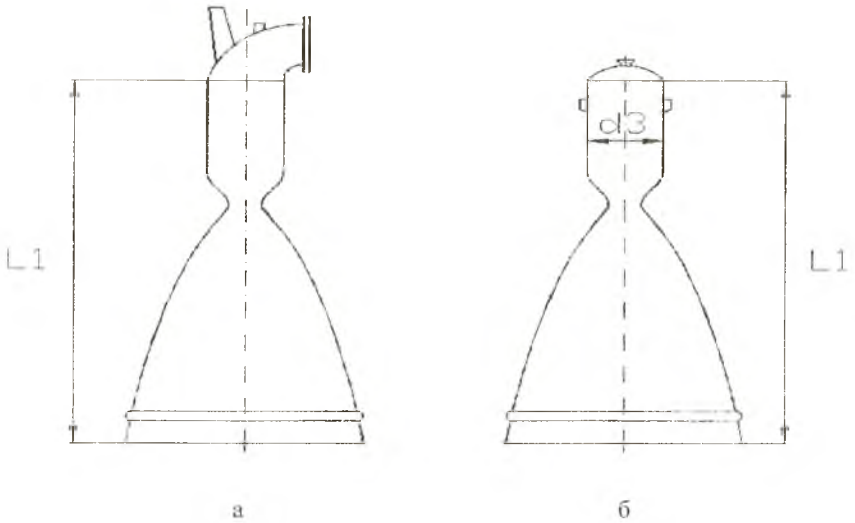


Рис.П2.1. Модели камер ЖРД: с дожиганием (а) и без дожигания (б);
 d_3 – диаметр камеры сгорания, L_1 – длина камеры

Крепления и расположение коллекторов должно соответствовать разработанному чертежу камеры.

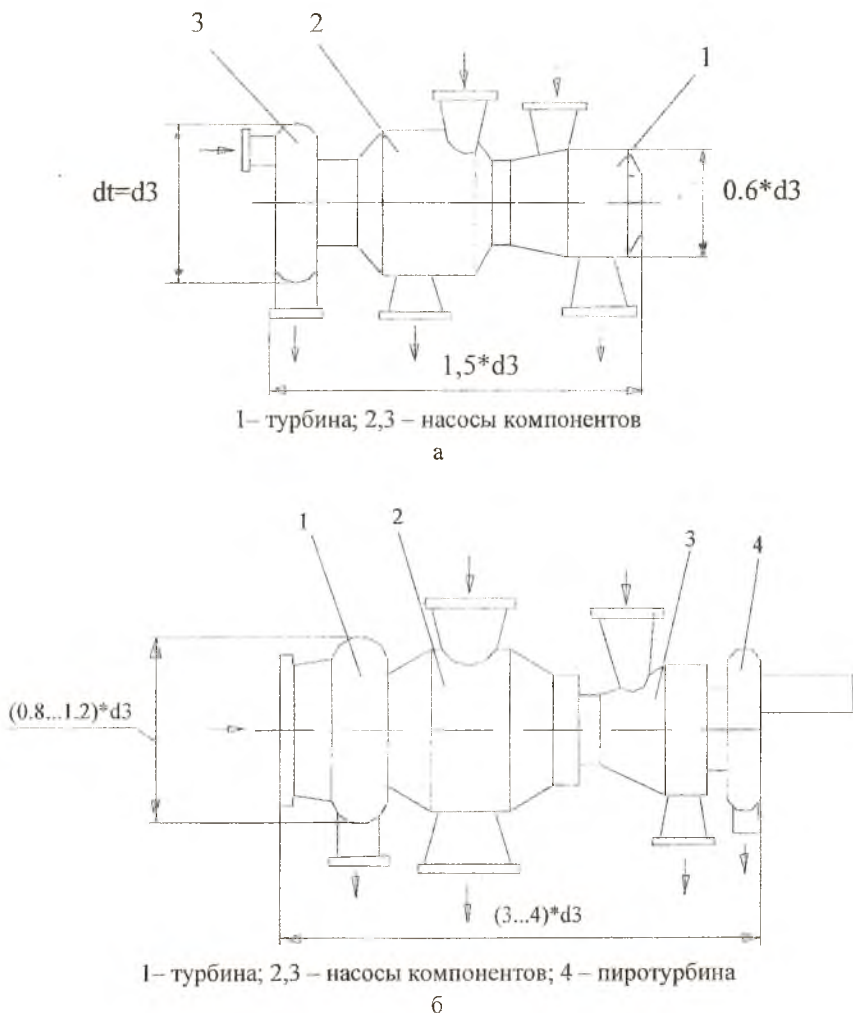


Рис. П2.2. Модели ТНА: а – ЖРД без дожигания, б – ЖРД с дожиганием

Основные размеры назначаются в зависимости от величины $d3$ (см. рис.П2.1).

В водородном ТНА диаметры насоса Г и турбины следует увеличить на 30-40%.

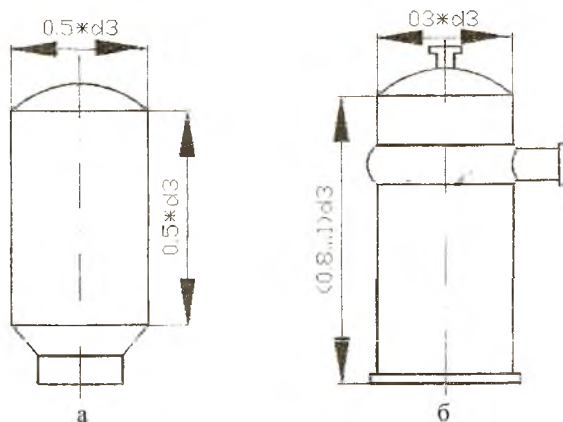


Рис. П2.3. Модели ЖГГ: а – однозонного; б – двухзонного

Размеры назначаются в зависимости от величины d_3 (см. рис.П2.1).

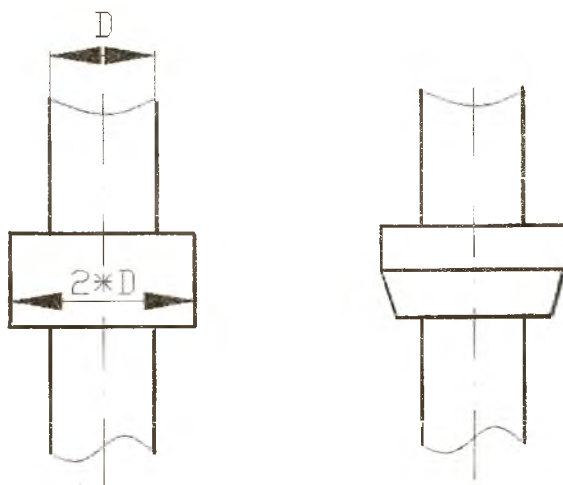


Рис. П2.4. Модели клапанов

Размеры назначаются в зависимости от величины диаметра трубопровода D .

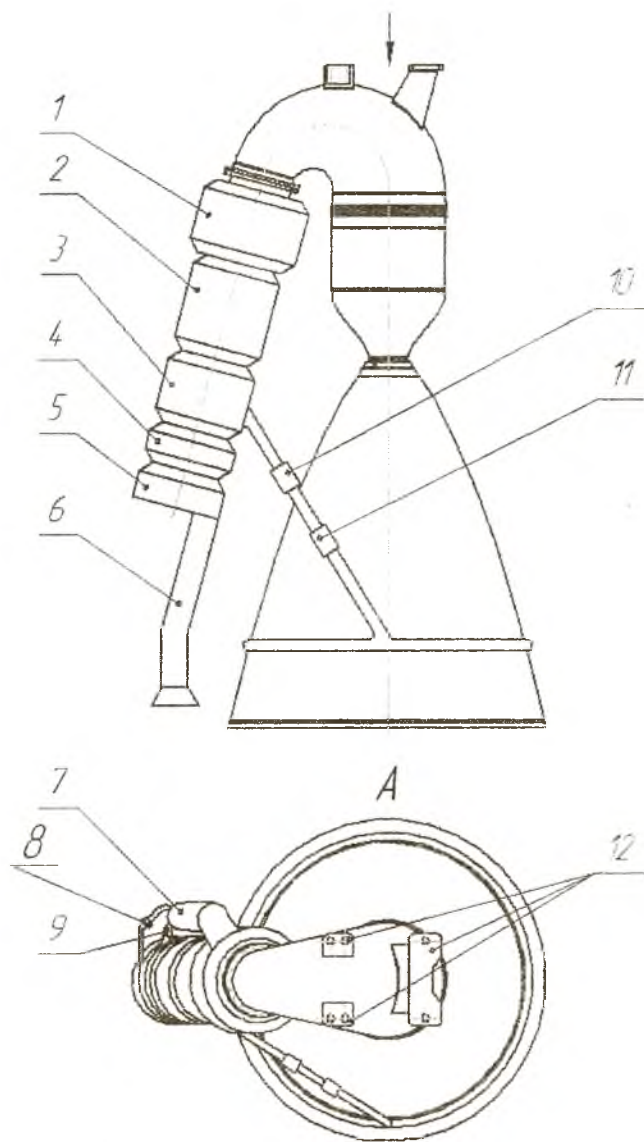


Рис. П2.5. Пример компоновки ЖРД с дожиганием генераторного газа:
 1 – турбина; 2 – насос О; 3 – насос Г; 4 – насос Г высокого давления;
 5 – пиротурбина; 6 – выхлоп пиротурбины; 7 – ЖГГ; 8 – клапан Г ЖГГ;
 9 – главный клапан окислителя; 10 – дросель СОБ; 11 – главный клапан Г;
 12 – опоры крепления

*Степень черноты окисленной поверхности
различных материалов*

Материал	t, °C	ϵ_c
Алюминий	200-600	0,11-0,19
Бронза	50-150	0,55
Медь	200-600	0,57-0,87
Сталь	200-600	0,80
Титан	300-1400	0,30-0,44
Никель	200-600	0,37-0,48
Хромоникель	125-1034	0,64-0,76
Ниобий	1000-1600	0,20
Молибден	600-1000	0,08-0,13
Вольфрам	1500-2000	0,24-0,31
Керамика огнеупорная	-	0,80-0,90

Некоторые физические свойства охладителей

Охлади- тель	Нормальные усло- вия			Критические условия			T _{разл.} , К	r_S , *) кДж/кг
	T _{пл.} , К	T _{кип.} , К	ρ , кг/м ³	T _{кр.} , К	P _{кр.} , МПа	$\rho_{кр.}$, кг/м ³		
Окисли- тели								
HNO ₃	230	359	1520	531	10,2	-	-	627
N ₂ O ₄	262	294	1440	431	10,2	-	-	418
O ₂	54	90	1140	154,3	5,004	430	-	214
H ₂ O ₂	272	424	1430	730	21,6	-	623	1517
Горючие								
Тонка- 250	228	188	845	631	3,4	-	-	302
Керосин	220	425	830	673	4,02	-	670	343
Аэрозин	266	345	900	607	11,5	-	570	989
НДМГ	216	335	790	522	5,35	-	523	583
H ₂ жидкий	13,9	20,4	70	33,2	1,27	31	-	454

*) r_S при T_{кип.}, при T_{кр.} $r_S = 0$

*Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К),
некоторых материалов от температуры*

Наименование материала	Температура, °С								$t_{пл},$ °С
	0	100	200	300	400	500	600	700	
Медь (чистая)	391	385	380	374	366	361	357	-	1080
Алюминий	202	205	229	272	318	370	423	-	649
Алюминиевый сплав АК-4	168	177	188	200	212	226	244	-	-
Бронза хроми- стая БрХ	334	330	325	320	316	311	307	302	1060
Сталь 08	93	81	69	60	52	44	40	38	1530
Сталь ЭЯ-1Т (1Х18Н9Т)	15	18	19	20	21	22	23	24	-
Титан	15	16	16,7	17	18	18,9	19	-	-
Никель	58,8	58,5	57,2	56,8	55,6	55	53,7	55,8	1450
Ниобий	52,3	53,5	57	59	61,6	64	66,3	68,6	-
Вольфрам	174	151	143	136	127	120	115	108	3390
Молибден	140	137	134	131	128	125	122	119	2620

Некоторые справочные данные для расчета пояса завесы

Зависимости газовой постоянной (R), характеристической скорости (β), и температуры продуктов сгорания (T) от массового соотношения компонентов топлива (k_m) [7]

Топливо: жидкий кислород + керосин

р, МПа	$\alpha_{ок}$	k_m	R , Дж/(кг·К)	β , м/с	T_c , К
10	0,5	1,363	497,85	1553	2137
25		1,363	497,4	1553	2140
50		1,363	496,1	1556	2149

Топливо: жидкий кислород + жидкий водород ($O_2 + H_2$)

р, МПа	$\alpha_{ок}$	k_m	R , Дж/(кг·К)	β , м/с	T_c , К
10	0,3	2,381	1220,4	2401	2066
25		2,381	1220,4	2404	2067
50	0,15	1,2	1220,4	2401	2067

р, МПа	$\alpha_{ок}$	k_m	R , Дж/(кг·К)	β , м/с	T_c , К
10-16	0,15	1,2	1884	2207	1180
	0,19	1,5	1645	2305	1450

**Прочностные свойства некоторых материалов,
используемых для изготовления деталей камеры [7]**

Наименование	Марка	σ_B , МПа, при температуре, К									
		20	77	203	293	573	673	873	973	1073	1173
Нержавеющая сталь	12Х18Н9Т	1850	1750	1190	620	460	450	400	400	280	150
Хромоникелевая сталь	Х16Н6	2000	1800	1450	1100	1070	800	430	-	-	-
-//-	2Х18Н12	1800	1500	1160	900	750	730	620	-	-	-
Титановый сплав	BT-20	1450	1400	1200	950	750	650	450	-	-	-
Бронза хромистая	БрХ0,8	-	-	-	300	250	200	140	120	80	-
Бронза циркониевая	БрЦр0,4	-	-	-	400	350	200	150	-	-	-

Примечания:

1. При отсутствии необходимых сведений для приближенной оценки можно пользоваться статистическими соотношениями:

$\sigma_T=0,5 \sigma_B$ – для нетермообработанных сталей и сплавов;

$\sigma_T=0,8 \sigma_B$ – для термообработанных сталей, сплавов и бронз;

$\sigma_T=0,9 \sigma_B$ – для титановых сплавов;

$\sigma_T=0,7 \sigma_B$ – для остальных металлов.

2. Прочностные свойства зависят от вида полуфабрикатов (лист, пруток, труба).

Прочность паяных швов, МПа [10]

Название припоя	Марка припоя	Паяемый материал	Температура спая, К												Примечание
			210		300		470		570		670		770		
			$\sigma_{\text{н}}$	$\tau_{\text{н}}$	$\sigma_{\text{н}}$	$\tau_{\text{н}}$	$\sigma_{\text{в}}$	$\tau_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{в}}$	$\tau_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{н}}$	$\tau_{\text{н}}$	$\sigma_{\text{н}}$	$\tau_{\text{н}}$	
Медно-никелевый	ВНР-1	Сталь - сталь	600	500	580	450	500	300	480	250	450	200	400	150	Используют при работе в коррозионной среде
Медно-никель-марганцевый	ВНР-2	"-"	400	300	330	250	280	260	270	250	260	200	150	130	
Медно-серебряный	ПСР-70	Сталь - бронза													Используют при работе в некоррозионной среде
	ПСР-40 ПСР-20	Бронза - бронза	300	270	280	245	250	200	230	150	150	130	120	70	

Сортамент конструкционных материалов [11]

Листовая холодно- и горячекатаная сталь толщиной:
0,5...0,8 мм через 0,05мм; 0,008...1,6 мм – через 0,1 мм;
1,6...3,2 мм – через 0,2 мм; 3,2...3,5 мм – через 0,3 мм;
4,0...5 – через 0,5 мм; 5...22 мм – через 1мм.

Круглая и шестигранная сталь толщиной:
3,1...4,2 мм – через 0,1мм; 4,2...16,2 мм – через 0,2 мм;
18...50 мм – через 1 мм.

Круглые и шестигранные прутки из бронзы толщиной:
3...10 мм – через 0,5 мм; 10...20 мм – через 1мм.

Листы бронзовые толщиной:
0,4...1,4 мм – через 0,1 мм; 1,8...2,2 мм – через 0,2мм.

**Основные технические требования
на сборочном чертеже камеры**

На сборочном чертеже камеры приводится список *технических требований*, включающий следующие разделы:

I. Требования к материалам и сварке

Например:

1. Сварка аргонодуговая или сварку проводить в среде аргона.
2. Присадочный материал для сварки соединительных колец с рубашкой – проволока св. – 04Х19Н9 (можно указать конкретные швы, соответственно обозначив их).
3. Не допускается попадание стружки и окалины в полость (или полости) Π_1, \dots (имеются в виду полости под соединительными кольцами).
4. Сварка соединений C_1 и C_2 – выполнять без присадки.
(Сварка бронзовой стенки часто выполняется без присадки неплавящимся электродом, C_1 и C_2 – обозначения сварных соединений).
5. Проплав сварного шва C_1 и C_2 с внутренней стороны не более 0,2мм обеспечить режимом сварки (требование необходимо, когда на стенке в месте сварки нет бурта с внутренней стороны).
6. На внутреннюю поверхность стенки А нанести покрытие окисью циркония толщиной ... (указать расчетную толщину с допуском $\pm 0,05$ мм).

II. Требования к правильности сборки

Например:

7. Несоосность средней и сопловой частей камеры не более ... (0,2 ... 0,5мм). При этом ось сопла определяется как прямая, проходящая через центры окружностей D и D_1 (D и D_1 диаметры сечений в критике и на срезе сопла).

8. Неперпендикулярность внутреннего дна оси сопла не более... (0,2...0,5мм) (обеспечить при сварке стенки и кромок внутреннего дна головки).

9. Отклонение от перпендикулярности плоскости опор(ы) относительно оси сопла на диаметре D_2 не более... (0,2...0,3мм) (D_2 – диаметр отверстий опор).

10. Смещение осей опор от номинального положения ... ($\pm 0,1...0,2$ мм).

В случае крепления камеры за цапфы вместо пунктов 9 и 10:

9а. Неперпендикулярность осей опор к оси камеры не более ... (0,1...0,2мм).

10а. Непересечение оси опор и оси камеры не более ... (0,3...0,5мм).

III. Требования к испытаниям

Например:

11. Испытать на прочность сварные швы соединительных колец гидропрессовкой при давлении $p = \dots$ (давление p рассчитывается для соединения головки с корпусом по [1] или по лекциям).

12. Испытать на герметичность сварные швы при давлении $p = 0,5...1$ МПа.

13. Пролить охлаждающий тракт водой с хромпиком по ТУ (знать зачем и как эта операция проводится).

IV. Требования по маркировке, хранению и транспортировке

Например:

14. Маркировать краской шифр и порядковый номер изделия (для этого на сопле выделить место прямоугольником).

15. Все патрубки и штуцера заглушить технологическими заглушками, сопло заглушить в критическом сечении.

16. Изделие транспортировать в вертикальном положении с постановкой его на срез сопла и креплением за опоры камеры.

Примечания:

1. Пояснения к ТТ (техническим требованиям) напечатаны курсивом и не входят в состав ТГ.

2. В ТТ необходимо указывать не диапазон величин, а конкретные числовые значения.

Основные параметры некоторых ЖРД

Основные данные некоторых ЖРД с ВПТ

Марка двигателя, фирма, страна, год разработки	Назначение	Топливо (Ок, Г)	k_m	$P_{гб}$ кН	$J_{у.гб}$ Н·с/кг
Белл 8258, США, 1960-1965	Взлетный, лунная кабина КК "Аполлон"	N_2O_4 А-50	1,6	16	3230
MJRA-10500, Спейс, 1960-1965	Посадочный, лунная кабина КК "Аполлон"	"-"	1,6	4,5-47,6	2980 3100
AJ-10-137, Эрод- жет, США	Маршевый, КК "Аполлон"	"-"	1,6	100	3150
AJ-10-138, Эрод- жет, США, ≈1960	3 ступень р-н "Титан 3С"	"-"	2	36	3120
TR-201, США TRW, ≈1965	2 ступень ракеты "Дельта"	N_2O_4 А-50	-	45	3020
Эроджет, США ≈1980	Система орбитальн. маневрирования КК "Shuttle"	N_2O_4 ММГ	-	27,2	3130
LRBA, Франция ≈1965	2 ступень "Корали" р-н "Европа"	N_2O_4 НДМГ	2	4x70	3000
КДУ-414 КБ Химмаш, 1965	Корректирующий ЖРД, «Молния-1»	HNO_3 НДМГ	2,6	1,96	2661
КРД-79 (С5-79) КБ Химмаш, ≈1970	Коррект. ЖРД, Салют 6, Мир, Модуль «Звезда»	N_2O_4 НДМГ	1.85	3,09	2937
17 Д61, "Икар" КБ Химмаш, ≈1981	Коррект. орбиты, Торможение	N_2O_4 НДМГ			

Примечания:

1. Множитель при P_n – число камер;
2. f_a – геометрическая степень расширения сопла;
3. J – суммарный импульс;
4. $p_б$ – давление в топливных баках.

(продолжение таблицы данных ЖРД с ВПТ)

$p_{кз}$ МПа	f_a	τ , с	J , МН·с	p_0 , МПа	Вид аккумулятора и рабочее вещество	Габариты (высота, диаметр), мм	Сухая масса двигателя, кг
0,9	45	960	15,36	-	ГАД гелий	1250 790	92
0,08 0,8	47	730	34,8	1,65	---	2880 1520	177
0,7	62,5	750	75,0	1,37	---	3880 2500	350
0,7	40	500	18,0	-	Азот	2050 1200	103
0,72	-	150	6,75	-	---	-	113
0,88	-	-	-	-	---	-	-
-	-	100	28,0	-	ЖАД	-	-
1,18		40			ГАД	1000 700	61
1,75		2700			ГАД	550 840	38,5
			2,7				

Основные данные некоторых ЖРД с НИТ

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	k_m	$P_{гн}$, кН	$J_{уП}$, Н·с/кг	$P_{к}$, МПа	f_a
<i>ЖРД без дожигания</i>							
LR-81-BA-13, Белл, США ≈1965	Ступень “Агента” ракет- носителей	N_2O_4+ НДМГ	2,55	72,7	3000	3,5	-
F-1, Рокитдайн, США ≈1965	1 ступень р-н “Сатурн” 5	O_2+RP-1	2,8	7940	2630	6,5	16
J-2, “-” ≈1965	1 и 2 ступень р-н “Сатурн” 5	O_2+H_2	5	1040	4260	5,05	27,5
H-1, “-” ≈1960	1 ступень р-н “Сатурн” 1В	O_2+RP-1	2,23	1040	2950	4,95	8
LR-87-AJ-9 Эроджет, США	1 ступень р-н “Титан” 3С	N_2O_4+ А-50	1,93	1070	2880	5,4	8
LR-91-AJ-9 Эроджет, США	2 ступень р-н “Титан” 3С	N_2O_4+ А-50	1,8	453	3160	5,75	49
“Викинг” 2 Франция	1 ступень р-н “Ариан”	N_2O_4+ А-50	-	700	2760	5,66	-
HM-60, Франция	1 ступень р-н “Ариан-5”	O_2+H_2	6,0	1025	4235	9,8	-
MВВ, ФРГ	3 ступень р-н “Ариан”	O_2+H_2	-	58,9	4340	2,95	-
HM-7, SEP, Франция	3 ступень р-н “Ариан”	O_2+H_2	5,35	4x 18	4250	3,57	-
HM-7, SEP, Франция	3 ступень р-н “Ариан-3”	O_2+H_2	4,5	70	4342	3,1	-
LR-99-RM-1, Тиокол, США	Эксперимент, X-15	O_2+NH_4	1,25	258	2760	4,2	9,8
“Гамма” 8 (BS-606), Англия	1 ступень р-н “Блэк-Эрроу”	“-”	“-”	8x 22	2170	-	-

(продолжение таблицы)

τ , с	J, МН·с	Способ газогене- рации	Давление за насо- сами, МПа	Зажигание в к. с., ЖГГ	Габариты (высота, диаметр), мм	Сухая масса двигателя, кг
<i>генераторного газа</i>						
240	32,5	ЖГГ	-	Самовоспл.	2100 900	136
165	1220	“	-	Хим. Электр.	5490 3660	8400
500	520	“	6,5 8,0	Электр.	3378 2045	1585
242	252	ЖГГ	5,6 7,0	Хим. Электр.	2400 1270	920
165	172	“	-	Самовоспл.	1065	890
220	100	ЖГГ	-	Самовоспл.	965	570
139	97,3	“	-	Самовоспл.	-	390
291	-	ЖГГ	12,6 15,0	“	4000 2520	1300
-	-	“	-	-	-	72
563	40,5	“	5,0	“	1617 847	145
565	-	ЖГГ	-	Электр.	-	152
120	31	H ₂ O ₂	70 80	Электр., разлож.	1800 900	415
-	-	-	96 82	“	-	-

Основные данные некоторых ЖРД с НПГ (без дожига генераторного газа)

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	k_m	P_n , кН	$J_{y,n}$, Н·с/кг	$P_{кз}$, МПа	f_a
"Гамма" 2 (BS-625), Англия	2 ступень РН "Блэк-Эрроу"	H_2O_2+ керосин	8,2	2x35	2650	4,8	-
LE-5, "Мицубиси", Япония	2 ступень РН	O_2+H_2	5	103	4340	3,63	-
LE-7, "Мицубиси", Япония	1 ступень РН	-	6	932	4405	14,7	-
РД-214 Энергомаш	2 ступень РН "Космос"	N_2O_4+ керосин	-	4x181,5	2640	4,5	7
РД-107, Энергомаш	1 ступень РН "Восток"	O_2+ керосин	-	4x255	3140	6,0	19
РД-119, Энергомаш	2 ступень РН «Космос»	$O_2 + НДМГ$	-	110	3520	8,0	100
РД-111 Энергомаш	1 ступень МБР Р-9	$O_2 +$ керосин	2,39	1628	3170	7,85	18
РД-219 Энергомаш	2 ступень МБР Р-16	АК-27И +НДМГ	2,5	883	2930	7,35	25,8
РД-0110 КБ Химавтоматик ≈1970	3 ступень РН «Союз»	O_2+ керосин	-	298	3195	6,8	-
С5.92 КБ Химмаш ≈1985	Разгонный блок «Фрегат»	N_2O_4+ НДМГ	1,95 - 2,05	19,6	3270	9,8	-
YF-24В Китай	2 ступень РН «CZ-4В»	N_2O_4+ НДМГ	-	80,4	-	-	-

(продолжение таблицы)

τ , с	J, МН·с	Способ газогенера- рации	Давление за насо- сами, МПа	Зажигание в к. с., ЖГГ	Габариты (высота, диаметр), мм	Сухая масса двигате- ля, кг
-	-	разложе- ние H_2O_2	84-96	термическое	-	162
370	-	ЖГГ	-	электр.	-	255
315	-	ЖГГ	-	"	-	1650
-	-	разложе- ние H_2O_2	-	хим.,	-	-
-	-	разложе- ние H_2O_2	-	пиротехн.	-	-
-	-	разложе- ние НДМГ	-	"	-	-
110	-	ЖГГ	-	пиротехн.	2340 2760	1480
125	-	ЖГГ	-	самовоспл.	2040 2200	665
240	-	ЖГГ	-	пиротехн.	1575 2240	410
200 0	-	ЖГГ	-	самовоспл.	1028 838	75
127	-	-	-	самовоспл.	-	-

Основные данные некоторых ЖРД с НИТ и дожиг. генераторного газа

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	k_m	$P_{нв}$ кН	$J_{y_{нв}}$ Н · с / кг	$P_{кв}$ МПа	f_0
RL-10-A-3, Прагг-Уитни, США, 1963	3 ступень р-н "Атлас- Центавр"	O_2+H_2	5	68	4440	2,81	40
SSME, Рокитдайн, США, 1981	МТКК «Спейс Шаттл»	O_2+H_2	6	2100	4520	21,0	120
11Д58М, Энергия, 1960	Двигатель разгон. блока	O_2+ керосин	-	83,4	3500	7,8	189
РД-253, Энергомаш, 1965	1 ступень РН "Протон"	N_2O_4+ НДМГ	-	1635	3110	14,7	-
РД-0219/0211 Химватмат. 1985	2 ступень РН «Протон»	N_2O_4+ НДМГ	-	582	3210	17,7	-
НК-9, СНТК им. Кузнецова, 1962	1 ступень РН ГР-9	O_2+ керосин	2,55	372,5 ×4дв.	3216	10,55	-
НК-31, СНТК им.Кузнецова 1970	3 и 4 ступень РН Н-1	O_2+ керосин	2,6	407	3460	9,38	124
НК-33, СНТК им.Кузнецова 1970	1 и 2 ступень РН Н-1	O_2+ керосин	2,62	1638	3244	14,83	27
КВД-1, Химмаш, 1977	Двигатель раз- гонного блока	O_2+H_2	6	69,6	4620	5,7	-
11Д57, «Сатурн-Люль- ка», 1967	3 ступень РН Н1	O_2+H_2	5,8	393	4565	10	143
РД-170, Энергомаш, 1980	1 ступень РН "Энергия" «Зенит»	O_2+ керосин	-	4х 2015	3296	25,0	-
РД-0120, Химватмат. 1985	2 ступень РН "Энергия"	O_2+H_2	6,1	2000	4462	21,8	85,7
РД-0124, Химват., 2000	3 ступень РН Союз-2	O_2+ керосин	-	294	3520	15,7	-

(продолжение таблицы)

τ, с	J, МН·с	Способ газогенерации	Давление за насосами, МПа	Зажигание в к. с., ЖГГ	Габариты (высота, диам.), мм	Сухая масса двиг., кг
440	30	Испарение Н ₂ в охл. тракте к. с.	70	Электр.	1010 _μ	133
300	630	ЖГГ	42	Электр.	4240 2670	2870
-	-	ЖГГ	-	Химическое	диам.-1200	300
130	-	ЖГГ	-	Самовоспл.	2780 1500	1280
		ЖГГ	-	Самовоспл.	2327 1470	566
150	-	ЖГГ	22-28	Пиротехн.	230	1588
120 0	-	ЖГГ	-	Пиротехн.	диам.1400	722
		ЖГГ		Пиротехн.	3075 1490	1222
800	-	-	-	Пиротехн.	2140 1680	286
800	-	ЖГГ	17,5-24	-	3660 1860	840
-	-	-	-	Химическое	-	11500
500	-	-	-	Электр.	4550 2420	3450
300	-	ЖГГ	-	Химическое	1575 2400	460