

Министерство науки, высшей школы
и технической политики Российской Федерации

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева

В.А.Борисов Д.Ф.Щечуткин

КОНСТРУКЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Самара 1993

УДК 621.455(075)

Конструкция и проектирование двигателей
летательных аппаратов: учеб. пособие
/В.А.Борисов, Д.Ф.Пичугин;
Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993.
95 с. ISBN 5-230-16929-4

Изложены рекомендации по выполнению курсо-
вого проекта по дисциплине "Конструкция и проек-
тирование двигателей летательных аппаратов".

Предназначены для студентов авиационного
института, изучающих специальность 13.04. Вы-
полнены на кафедре КИПДА.

Табл. 2. Ил. 28. Библиогр.: 18 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского
совета Самарского государственного аэрокосмического
университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: В.И.Цейтлин, А.Б.Макушин

ISBN 5-230-16929-4 © Самарский государственный
аэрокосмический университет,
1993

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ц е л ь 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; выработать навыки самостоятельной работы.

К у р с о в о й п р о е к т я в л я е т с я с а м о - с т о я т е л ь н о й р а б о т о й с т у д е н т а , к о т о - р ы й о т в е ч а е т к а к з а о б о с н о в а н н о с т ь п р и н я т ы х р е ш е н и й , т а к и з а к а ч е с т в о о ф о р м л е н и я п р о е к т а и в ы п о л н е н и е е г о в с р о к .

Консультант проекта постановкой наводящих вопросов и указанием литературы лишь направляет студента на правильный путь решения задач.

Проект по дисциплине "Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов" (КиПДЛА) является продолжением курсовых работ по дисциплинам "Теория двигателей летательных аппаратов" [8], "Теория и расчет лопаточных машин" и курсового проекта по "Динамике и прочности ДЛА".

Из указанных работ должны быть взяты следующие исходные данные:

назначение двигательной установки (ДУ);
тяга и пределы ее изменения;
компоненты топлива и его расход;
среднее массовое соотношение компонентов топлива и предел его изменения, соотношение компонентов в ядре потока и в пристеночном слое газа;
структурная схема двигателя;
участие двигателя в управлении летательным аппаратом;
время работы двигателя в течение одного включения;
число включений в полете;
число полетов ЛА;
изменение давления газа по длине сопла;
Температуры газа на входе в сопло в ядре потока и в пристеночном слое;
перепад давления компонентов топлива на форсунках;
схемы и основные размеры форсунок смесительной головки камеры;
схемы головки камеры и расположения форсунок на внутреннем днище;
контур газодинамического тракта камеры и его размеры;
тип газогенераторов двигателя;
температура газа на входе в смесительную головку камеры (в системе с дожиганием);
давление охладителя на входе и выходе из тракта охлаждения камеры;
габариты и контур ТНА.

2. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ ПРОЕКТА

При выполнении курсового проекта необходимо:
ознакомиться с требованиями к проектируемой двигательной установке и записать особенности ее конструкции;
разработать принципиальную схему ДУ, составить циклограмму ее 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 компоновку камеры;

выбрать материалы для изготовления элементов камеры и рассчитать на прочность эти элементы;

выбрать технологию изготовления деталей камеры, порядок ее сборки и испытаний;

начертить рабочий чертеж форсунки;

вычертить сборочный чертеж камеры и назначить технологические требования на ее сборку и испытания;

выполнить по указанию консультанта специальное задание;

оформить пояснительную записку к проекту.

Графическая часть проекта должна состоять из 3-4 листов ватмана формата А1, а пояснительная записка - из 30-40 листов писчей бумаги формата А4.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовое проектирование студент начинает одновременно с изучением дисциплины "КипДЛА" в часы обязательных занятий и самостоятельной работы.

3.1. Функциональное проектирование двигательной установки

Функциональное проектирование [1] было начато на кафедре "Теория двигателей".

После проработки раздела дисциплины "Требования к ДЛА и этапы их создания" [1] студенту необходимо записать требования к проектируемому двигателю, определяемые его назначением и видом используемого топлива. Одновременно должна быть выбрана конструктивная схема ДУ, 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 ТДЛА, то студент должен согласовать ее с консультантом проекта. Желательно также выбрать прототип проектируемого двигателя.

3.1.1. Проектирование пневмогидроэлектрической системы ДУ

В процессе изучения раздела дисциплины КиЦДА студент знакомится с системами, обеспечивающими работу ДУ.

Все функциональные системы КРДУ конструктивно объединены в единую пневмогидроэлектрическую систему (ПГЭС). Документально ее оформляют в виде принципиальной схемы (пневмогидроэлектрической схемы – ПГЭСх) [1], на которой изображают все агрегаты системы и связи между ними. Чтобы не усложнять восприятие, ее представляют в виде двух схем – пневмогидравлической (ПГСх) и электрической (ЭСх).

Электрическая схема ДУ приведена в пособии [4]. В курсовом проекте ее не разрабатывают.

При разработке ПГСх исходят из структурной схемы КРДУ, выбранной для проектируемого двигателя [8].

Из схем, приведенных в пособиях [1, 2] или в других, студент выбирает ту, которая наиболее соответствует проектируемой КРДУ, и, проанализировав ее, составляет ПГСх проектируемого двигателя. Так как исходная ПГСх не всегда будет полностью соответствовать проектируемой, студент может изменять ее, стараясь обеспечить все требования к системам КРДУ, указанные в пособии [1].

В пособиях обычно приводят неполные ПГСх (без баковой части). Студент должен спроектировать ПГСх полностью, воспроизведя недостающую часть схемы самостоятельно.

При вычерчивании ПГСх следует пользоваться только условными обозначениями, указанными в ГОСТ 29763–77. Эти обозначения приведены в приложении I пособия [1]. Одновременно необходимо составить перечень агрегатов, изображенных на ПГСх. Выбирая тип агрегата, надо учитывать число включений его в полете, время срабатывания, вид рабочего вещества, текущего через него, и расход этого вещества [3]. В ПГСх должны быть включены все агрегаты, обеспечивающие предпусковую подготовку, запуск, работу на основном режиме и останов двигателя.

Предпусковая подготовка КРДУ включает в себя следующие операции:

предстартовый наддув баков;

преддувку всех магистралей компонентов после разделительных клапанов (для кислородно-водородных КРДУ) для удаления воздуха, с которым водород образует взрывоопасный гремучий газ, и паров воды,

которые, конденсируясь и замерзая, превращаются в льдинки, забивающие отверстия форсунок;

заливку насосов и, при криогенных компонентах топлива, их захлаживание.

Запуск включает в себя:

продувку полостей камеры и жидкостного газогенератора (ЖГГ) по магистрали подачи одного из компонентов в случае, если опережающий компонент газифицирован (при работе воспламенителя, в камерах двигателей с дожиганием, при использовании криогенного компонента);

включение воспламенителей при использовании несамовоспламеняющихся компонентов топлива;

раскрутку ТНА;

вывод двигателя на основной режим работы;

включение наддува баков на этом режиме.

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

регулирование кажущейся скорости;

системы одновременного опорожнения баков;

управления вектором тяги.

Кроме того, если это необходимо по условиям работы, в ней должны быть предусмотрены системы регулирования тяги или соотношения компонентов топлива в камере и ЖГГ.

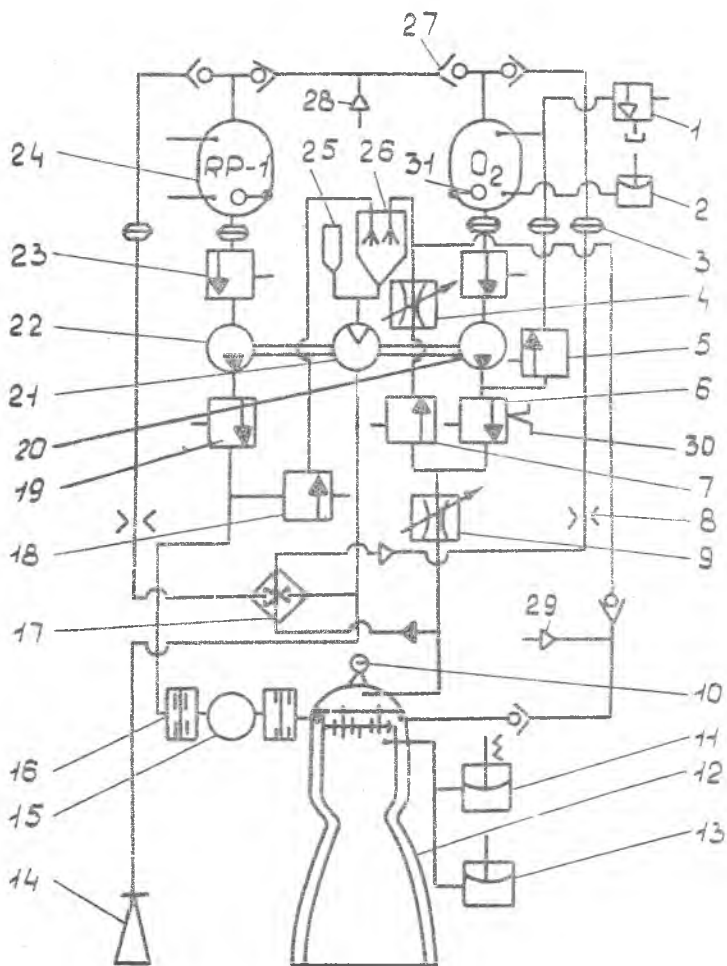
Система останова ЖРДУ должна обеспечить безопасность выключения двигателя и минимальный импульс последствия его тяги.

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

В качестве примера оформления ПГСх на рис. I приведена схема ДУ с системой НПГ без дожигания, работающей на топливе $O_{2,жк} + RP-1$ (синтетический керосин). Она предназначена для первой ступени ракеты-носителя.

К схеме прилагается перечень агрегатов (табл. I).

На ПГСх состояние агрегатов изображают в момент времени, предшествующей 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



Р и с. I. Пневмогидравлическая схема ДУ

Т а б л и ц а I

Перечень агрегатов к схеме ПСХ

Номер агрегата	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество
1	Дренажный клапан	Пневмогидравлический	2
2	Реле давления бака	Мембранное	2
3	Сильфон	-	5
4	Регулятор системы РКС	Электромеханический	I
5	Циркуляционный клапан	Пневмогидравлический	I
6	Главный клапан O_2	Пневмогидравлический	I
7	Клапан O_2 ЖТ	-	I
8	Дроссельная шайба	-	2
9	Регулятор системы СОБ	Электромеханический	I
10	Узел крепления камеры	Шарнирный	I
11	Датчик давления газа в камере	Потенциметрический	I
12	Камера двигателя	-	I
13	Реле давления камеры	Мембранное	I
14	Утилизационное сопло	-	2
15	Баллон с триэтилалюминием	-	I
16	Мембрана свободного прорыва	-	2
17	Испаритель	-	I
18	Клапан $RP-1$ ЖТ	Пневмогидравлический	I
19	Главный клапан $RP-1$	Пневмогидравлический	I
20	Насос O_2	Центробежный	I
21	Турбина ТНА	Активная	I
22	Насос $RP-1$	Центробежный	I
23	Клапан входной	Пневмогидравлический	2
24	Бак	-	2
25	Пиростартер	-	I
26	Жидкостный газогенератор	Восстановительный	I
27	Обратный клапан:		6
28	подвод гелия от наземной системы для наддува баков;	-	I
29	подвод гелия от наземной системы для продувки магистрали O_2 ЖТ и $RP-1$ камер	-	I

оси абсцисс которого откладывают интервалы времени с момента начала запуска или останова до момента срабатывания того или иного агрегата автоматики, а по оси ординат — изменения 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. 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.).

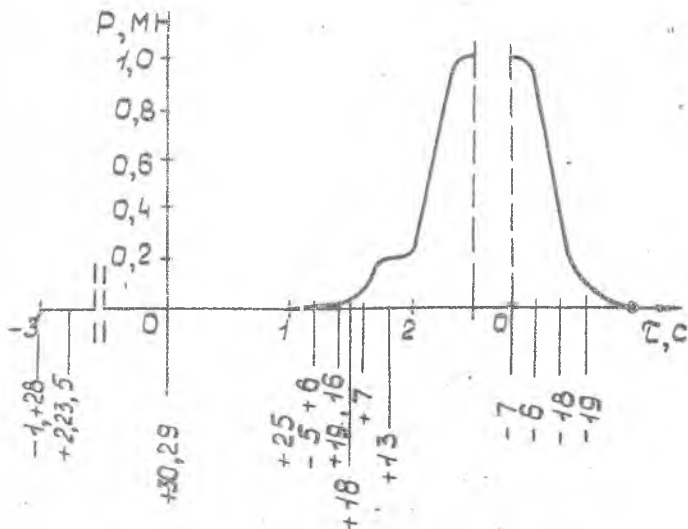
Время протекания запуска, которое обычно отсчитывают с момента начала расхода топлива через двигатель, составляет 0,8...5,0 с, причем наименьшее время затрачивается на непрограммированный, а наибольшее — на программированный запуск с несколькими промежуточными режимами.

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.

Время срабатывания агрегатов при запуске откладывают вправо от нуля, который соответствует моменту начала расхода рабочих веществ (продувочного, генераторного газов и 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



Р и с. 2. Циклограмма работы ДУ

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 в бак, где и происходит их конденсация. Таким образом осуществляют захлаживание насоса O_2 .

При расчетном показании термометры 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 КГТ.

Через 1 с после включения продувки подается команда на воспламенитель пиростартера 25 и турбина 21 начинает раскрутку насосов 20 и 22. Спустя 0,2 с закрывается клапан циркуляции 5, открывает-

ся главный клапан 6, окислитель поступает в камеру I2 и вместе с продувочным гелием истекает из сопла. В то же время гелий препятствует попаданию паров O_2 в полость горючего головки.

Еще через 0,2 с открывается клапан I9 и под давлением основного горючего прорываются мембраны I6. Триэтилалюминий $(C_2H_5)_3 Al$ из баллона I5 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 0,1 с открывается сначала клапан I8 горючего, а затем — клапан окислителя 7 ЭТТ 26 с тем, чтобы в ЭТТ 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 ЭТТ происходит от горячих газов пиростартера.

Некоторое время турбина работает на смеси газов, а после выгорания твердого топлива пиростартера переходит целиком на питание от ЭТТ. Двигатель выходит на предварительный режим работы с тягой, которая определяется расходом O_2 через регулятор 4 и составляет примерно 20% от номинальной величины. По истечении 1,8 с от начала запуска и при срабатывании реле давления I3 поступает команда на увеличение проходного сечения регулятора 4. Запуск заканчивается через 2,2 с после подачи команды на продувку с выходом двигателя на режиме номинальной тяги. В этот момент регулятор 4 подключается к системе регулирования кажущейся скорости, а регулятор 9 — к системе одновременного опорожнения баков.

Надув баков на основном режиме работы производится следующим образом: бак горючего наддувается генераторным газом, охлажденным в испарителе I7, 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, СОБ и системы управления вектором тяги [4]. Для иллю-

страции работы этих систем и системы регулирования тяги необходимо составить их функциональные схемы (приложение II).

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 системы управления вектором тяги в ДУ с тягой до 0,5 МН обычно используют способы "а", "в", "г" [1] с рулевыми утилизационными соплами, а в системах с дожиганием - способ "д" с отбором газа на два рулевых сопла для управления по крену. Для ДУ с тягой более 0,5 МН применяют способы "г" и "д", но вместо рулевых сопел устанавливают рулевые камеры, или же способы "е" и "ж".

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 ЖТГ и обороты ТНА снижаются. С интервалами в 0,2 с закрываются последовательно клапаны 6, 8 и 19 и через 1 с тяга ДУ снижается до нуля. Такая последовательность останова предусматривает снижение гидроударов в магистралях подачи компонентов при закрытии главных клапанов и снижении температуры нагретых деталей двигателя.

3.1.2. Компоновка двигателя

После решения функциональных схемных вопросов проектирования ДУ необходимо выбрать и зарисовать компоновочную схему двигателя [3]. На ней изображают все основные его агрегаты (камеру, ТНА, ЖТГ, клапаны, регуляторы, узлы подвески двигателя к ДА) в виде контурных очертаний, а также их взаимное расположение и соединение. Основой для этого являются конструктивная схема двигателя, ПСх, контуры ТНА и других агрегатов.

На компоновочной схеме должно быть минимум два вида на двигатель, расположенных в проекционной связи (вид сбоку и вид сверху). При этом надо выбирать такой вид сбоку, на котором можно было бы показать наибольшее число основных агрегатов. Позиции агре-

готов должны иметь те же номера, что и на ПГСх, или же дополнительные, которые вносятся в перечень агрегатов позднее.

Компоновочную схему вычерчивают на миллиметровке формата А3 или А4 и помещают в начале записки вместе с описанием конструкции двигателя.

Все вышеупомянутые работы должны быть выполнены в седьмом семестре.

3.2. Проектирование камеры двигателя

В восьмом семестре студент приступает к проектированию камеры двигателя.

Порядок проектирования камеры изложен в пособии [1]. Часть вопросов по ее проектированию (расчет процессов в камере, выбор формы и размеров ее элементов, вида теплозащиты) рассмотрена в работе [8].

3.2.1. Проектирование системы теплозащиты элементов камеры двигателя

На основе данных работы [8] студент производит расчет основного способа теплозащиты элементов камеры (регенеративного охлаждения с учетом пристеночного слоя газа, образованного периферийными формунками смесительной головки).

Порядок выполнения работы изложен в пособии [1]. Необходимые исходные данные берутся из курсовой работы [8], а часть из них выбирается согласно рекомендациям пособия [3]. При выборе материала стенки камеры можно руководствоваться следующим: при $\bar{p}_k \leq 4$ МПа используют для ее изготовления нержавеющей сталь, а при \bar{p}_k - бронзу.

Первая часть расчета регенеративного охлаждения производится на ЭВМ по программе, составленной доц. В.А.Борисовым.¹

Определение исходных данных для расчета. Исходные данные, необходимые для расчета, включают в себя геометрические размеры газового тракта камеры, параметры газа на входе в сопло, параметры и теплофизические свойства охладителей, свойства материала стенки, ее толщину и допустимые температуры системы регенеративного охлаждения [1].

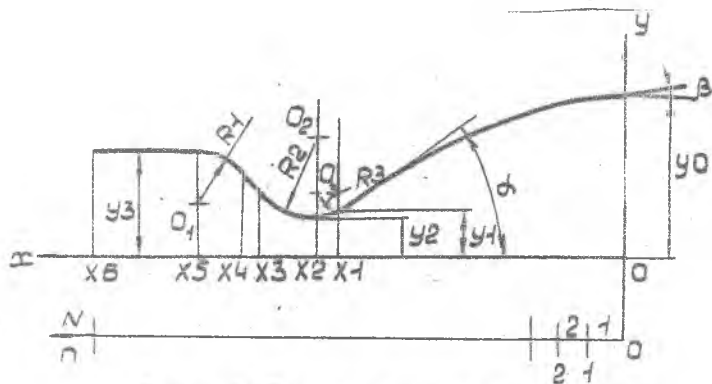
¹ Порядок оформления любых расчетов указан в работе [13].

Вначале необходимо вычертить контур газового тракта камеры на миллиметровке формата А3 или А4 или же воспользоваться его чертежом в работе [8] и выбрать материал стенки, ее толщину, температуру ее горячей поверхности [3].

Геометрические размеры, снятые с контура газового тракта, позволяют ЭВМ определить по уравнениям, описывающим отдельные его участки [1], полный профиль сопла камеры.

Для упрощения расчета принята схема теплообменника с противотоком, в которой ввод охладителя в тракт охлаждения предусмотрен у среза сопла.

Поэтому продольные размеры $X_1 \dots X_6$ отсчитывают по оси сопла от его среза (рис. 3). Поперечные размеры Y_0, Y_2, Y_3 * отсчитывают от оси сопла. Радиусы скругления профиля сопла R_1, R_2 и R_3 имеют центры, ординаты которых вычисляются в процессе выполнения программы. Также вычисляется точка профиля сопла с координатами X_1, Y_1 , в которой начинается параболический участок сопла. Для этого должен быть задан угол α (в программе - ALPHA), определяющий направление касательной к профилю в точке X_1, Y_1 .



Р и с. 3. Размеры газового тракта камеры

* Ордината Y_5 в программу условно вписана как Y_3 .

Примечание. При снятии размеров профиля сопла с чертежа могли быть допущены геометрические ошибки. Поэтому рекомендуется провести проверку выполнения условий

$$R1 > (x5 - x4);$$

$$R2 > (x3 - x2),$$

что исключает появление отрицательного числа под радикалом.

Если же сужающаяся часть сопла образована сопряжением дуг радиусами $R1$ и $R2$ (при этом $x3 = x4$), то должно выполняться с точностью до 3% равенство

$$(R1 + R2)^2 = (x5 - x2)^2 + (R2 + y2 + R1 - y3)^2.$$

Затем необходимо выбрать число участков N , на которые следует разбить контур сопла поперечными сечениями, исходя из следующего соотношения:

$$N \leq \frac{53}{(x6 - x5)/(x5 + 1)}.$$

Если $x5 < 0,6$ м, достаточно $N = 30$.

Для расчета плотности конвективного теплового потока необходимы следующие данные:

- $n = k$ - показатель изоэнтропы расширения газа в сопле [8];
- $T_{cr} = T_{SH}$ - температура горячей поверхности стенки, K [3];
- $T_{cr}^* = T_K$ - температура газа в пристеночном слое, K [8];
- $c_{p,p} = c_p$ - равновесная массовая теплоемкость газа в пристеночном слое, $Дж/кг \cdot K$ [5];
- $\eta = ET$ - динамическая вязкость газа, $Н \cdot с/м^2$ [5] (например, $\eta = 0,676 \cdot 10^{-4}$, запись $ET = 0,676E-04$);
- $\dot{m} = VS$ - суммарный массовый расход топлива через камеру, $кг/с$ [8].

Расчет плотности лучистого теплового потока ведут с использованием следующих данных:

- $T_{г.я} = TKR$ - температура газа в ядре потока, К [8];
 $\varepsilon_c = ECT$ - степень черноты стенки (приложение I);
 $\bar{p}_{H_2O} = PNO$ - относительное парциальное давление паров воды [5];
 $\bar{p}_{CO_2} = PCO$ - относительное парциальное давление углекислого газа [5];
 $p_k = PK$ - давление газа в камере сгорания, МПа [8].

Для определения теплофизических свойств охладителя (теплоемкости c_x , плотности ρ_x и комплекса Z_x) необходимо указать вид охладителя (керосин, НДМГ).

Данные для расчета нагрева охладителя:

- $m = VL$ - массовый расход охладителя, кг/с [8];
 $T_{xвх} = TLB$ - температура охладителя на входе в тракт охлаждения, К [3];
 $T_{x\theta} = TLD$ - допустимая температура жидкости на выходе из тракта охлаждения (приложение 2).

Расчет зазора в кольцевом тракте охлаждения:

- $h = HS$ - толщина стенки, м [3];
 $\lambda = U$ - коэффициент теплопроводности материала стенки при ее средней температуре $T_c = TS = \frac{THD + TD}{2}$, кВт/м·К (приложение 3);
 $w_{x\theta} = WD$ - предельная скорость течения охладителя в тракте, м/с [3];
 $T_{с.х.}\theta = TD$ - предельная температура холодной поверхности стенки, К [3];
 $T_{с.г.д} = THD$ - предельная температура горячей поверхности стенки, К [3].

Запись исходных данных и проведение расчета. Подготовленные исходные данные студент записывает в таблицу (приложение 4) и согласовывает с консультантом проекта. В первом приближении тракт охлаждения принимают щелевым.

Расчет ведется в диалоговом режиме по программе "OXLADA", которую вызывает по просьбе студента оператор машины.

По запросам машины последовательно вводятся все данные из таблицы. Машина предлагает назначить один из четырех охладителей: керосин, H_2O , НДМГ или гидразин. Другие охладители, близкие по физическим свойствам к НДМГ или гидразину, можно свести к ним.

Результаты расчета выдаются в виде двух таблиц, вначале на экране дисплея, а затем по решению расчетчика делается их распечатка.

Прежде чем принять решение о печатании таблиц, необходимо внимательно просмотреть их на экране дисплея. В первой таблице следует обратить внимание на столбец TL , во второй — на столбцы W , TH и TC . Появление нереальных значений этих величин говорит об ошибках в исходных данных.

Первая таблица представляет собой расчет системы охлаждения в предположении $T_{cr} = const$ по длине сопла. Она содержит следующие столбцы:

I - номер сечения;

X, Y - координаты точек профиля;

$$DT - \Delta = \frac{d}{d_*};$$

$SAMMA - \gamma$;

$ALG - \alpha_r$;

$QK - q_k$;

$QR - q_r$;

$QS - q_s$;

$TL - T_x$.

В конце отпечатано выполнение или невыполнение условия обеспечения общего теплосъема и номер критического сечения.

Во второй таблице напечатаны результаты расчета параметров системы теплозащиты уже на стационарном (равновесном) режиме работы. Она содержит следующие столбцы:

I, X ;

W - скорость течения охладителя;

$AL - \alpha x$;

$Q_{K1} \text{ и } Q_{S1} - q_{к.р} \text{ и } q_{г.р}$;

$TH - T_{с.г.р}$;

$TC - T_{с.х.р}$.

В заключение печатается величина щелевого зазора в тракте.

Проектирование оребрения тракта охлаждения корпуса камеры.

Оребрение выполняет следующие функции:

обеспечивает прочность стенки, нагруженной перепадом давления Δp и нагретой до высокой температуры;

улучшает теплоотвод от стенки в охладитель.

Последнее обеспечивается только при правильно спроектированном оребрении, которое характеризуется коэффициентом эффективности оребрения $K_{\text{э}}$ [3].

При выполнении курсового проекта необходимо выбрать параметры оребрения так, чтобы обеспечить прочность стенки, $K_{\text{э}} \gg 1$ 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 и в месте разъема сборочных единиц корпуса, критическое сечение и сечение на цилиндрическом участке корпуса, а также несколько промежуточных сечений, положение которых определяют в процессе расчета.

Толщину k_p и высоту δ_p ребра по длине тракта охлаждения обычно оставляют постоянными, а ширина канала b будет изменяться при изменении радиусов поперечного сечения сопла.

При выборе числа ребер i необходимо выдержать условие

$$b_p < b_{p.\text{макс.}}$$

где $v_{p \text{ макс}}$ - максимальная ширина канала по условию обеспечения прочности [1]:

$$v_{p \text{ макс}} = h_p \sqrt{\frac{2\sigma_T}{[n_T] \Delta p'}};$$

σ_T - предел текучести материала стенки при ее средней температуре в данном сечении сопла;

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

$\Delta p' = p_x - p_r$ - перепад давления на стенке;

p_x, p_r - давления охладителя и газа в данном сечении.

Изменение давления газа в сопле и давления на входе и выходе из тракта охлаждения определены в работе [8]¹. Условно можно принять, что изменение давления охладителя в тракте следует линейному закону и в любом сечении это давление можно найти из выражения

$$p_{xi} = (p_{x \text{ вх}} - p_{x \text{ вых}}) \frac{x_6 - x_i}{x_5} + p_{x \text{ вых}},$$

где $p_{x \text{ вых}} = p_x + \Delta p_{\text{ф}}$.

Предел текучести материала стенки определяют по справочникам.

Оребрение средней части корпуса. Вначале определяют параметры оребрения в критическом сечении сопла. При этом исходят из того, что в этом сечении ширина каналов должна быть близка к минимальной. Для снижения гидравлических потерь желательно выбирать квадратное сечение канала, поэтому предварительно можно принять

$$v_{p \text{ ж}} \approx v_{\text{ш}},$$

удовлетворяя при этом неравенству

$$v_{p \text{ макс ж}} > v_{p \text{ ж}} \approx 1 \text{ мм}.$$

¹ Изменение давления газа в сопле камеры можно также определить по графику работы [18].

Назначив ширину ребра $h_p = 1,0 \dots 1,5$ мм, можно определить предварительно шаг ребер и ориентировочное число ребер

$$i_p' = 2\pi(r_x + h + 0,5\delta_{ш}) \frac{1}{s_p' r_x},$$

где r_x - радиус критического сечения.

Округляя полученный результат в большую сторону до целой величины (желательно - кратной 90 для удобства фрезерования) получают точные размеры s_{p_x} , r_{p_x} и проверяют условие $r_{p_x} < r_{p_x \text{ макс}}$

После этого можно найти зазор между стенками (высоту ребра) при наличии оребрения

$$\delta_{p_x} = \delta_{ш} \frac{r_{p_x} + h_p}{r_{p_x}}.$$

Средняя часть корпуса камеры включает развальцованный участок стенки за критическим сечением. Максимальный внутренний радиус r_e поперечного сечения этого участка по технологическим соображениям (отсутствие растрескивания материала) составляет для стальной стенки не более $1,2 r_x$, а для бронзовой стенки - не более $1,4 r_x$. Соответственно изменится и r_{p_e} , которое должно быть менее $r_{p_e \text{ макс}}$. Обычно это условие выполняется и число ребер на этом участке делают постоянным.

Число ребер, принятое в критическом сечении, часто удается сохранить и на цилиндрическом участке стенки корпуса. В этом случае шаг ребер на нем определяют из пропорции

$$\frac{s_{p_ч}}{s_{p_x}} = \frac{r_ч}{r_x}$$

и проверяют выполнение условия

$$r_{p_ч} = s_{p_ч} - h_p < r_{p_ч \text{ макс}}.$$

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

$$r_{ср} = \frac{r_ч + r_x}{2}.$$

Оребрение расширяющейся части сопла. Проектирование оребрения на этой части начинают со среза сопла. Предварительно определяют шаг ребер в этом сечении

$$s_{p,a} = v_{p,a, \max} + k_p$$

и число ребер $i_{p,a}$

Округляя это число в большую сторону до целой величины, получают необходимые значения $i_{p,a}$, $s_{p,a}$ и $v_{p,a}$.

Далее находят сечение v , расположенное на меньшем радиусе, в котором необходимо уменьшить число ребер. Для снижения гидравлических потерь желательно иметь $v_{p, \min} > 1,5$ мм. Тогда из пропорции

$$\frac{z_{v, \min}}{z_a} = \frac{s_{p,v}}{s_{p,a}}$$

можно найти $z_{v, \min}$.

Приняв на следующем участке стенки $z_{c, \max} = z_{v, \min}$, определяют подобным же образом число ребер и $z_{c, \min}$. Если $z_{c, \min} > z_c$, то необходим еще один или два участка с меньшим числом ребер.

Для облегчения фрезерования каналов стенки желательно на соседних участках число ребер изменять вдвое. При другом соотношении ребер на соседних участках в месте перехода протачивают кольцевую канавку шириной 4...5 мм для выхода фрезы.

После этого рассчитывают коэффициент эффективности $K_{эп}$ [I] в критическом сечении и в сечениях с максимальным радиусом участков. Результаты расчета сводят в табл. 2. Сечения v и c следует связать с номерами сечений.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета оребрения стенки

Номер сечения	др. МПа	T_c, K	бт. МПа	v_{\max}, M	i_p	$v_{p, M}$	$s_{p, M}$	$K_{эп}$	Примечание

Анализ результатов расчета системы регенеративного охлаждения. Следующим этапом проектирования системы теплозащиты является анализ выполнения условий надежности регенеративного охлаждения [I].

Если эти условия выполняются, а $k_{зр} > 1$, то расчет системы теплозащиты считается завершенным.

В случае, если условия надежности не выполняются, необходимо произвести пересчет параметров системы теплозащиты.

Пересчет параметров системы охлаждения с учетом $k_{зр}$. Эта операция производится по методике, изложенной в пособии [1]. Учитывая, что изменение $T_{с.г}$ при этом будет невелико, можно допустить, что и α_r, α_x при пересчете будут неизменными.

В курсовом проекте можно ограничиться пересчетом только в критическом сечении сопла.

Используя обозначения, принятые в таблицах результатов расчета регенеративного охлаждения, зависимости пересчета можно записать в виде

$$\text{при } T_{с.г1} = TSH \quad \frac{q_{к2}}{q_{к1}} = \frac{QK}{QK} = 1;$$

$$\text{при } T_{с.г2} = TH \quad \frac{q_{к2}}{q_{к1}} = \frac{QK1}{QK}.$$

Проведя через эти точки прямую, получим зависимость

$$q_k = f_1(T_{с.г}).$$

$$\text{При } T_{с.г1} = TL \quad \frac{q_k(c-x)_2}{q_k(c-x)_1} = - \frac{QR}{QK1},$$

$$\text{при } T_{с.г2} = TH \quad \frac{q_k(c-x)_2}{q_k(c-x)_1} = \frac{1}{QK1} \left(\frac{TH - TL}{\frac{HS}{U} + \frac{1}{ALk_{зр}}} - QR \right).$$

Прямая, проведенная через последние две точки, представляет собой зависимость $q_k(c-x) = f_2(T_{с.г})$.

Точка пересечения прямых позволяет определить величины равновесного отношения $\left(\frac{q_{к2}}{q_{к1}} \right)_p$ и $T_{с.г.p}$. Затем определяют величины $q_{к2p} \cdot q_{к2p}$ и $T_{с.г.p}$. Если удовлетворяются условия надежности охлаждения, то в курсовом проекте можно ограничиться этим результатом.

Если же и с учетом $k_{зр}$ условия надежности охлаждения не выполняются, необходимо принимать дополнительные меры по

усилению теплозащиты степени камерн на основе анализа табл. 4.2 работы [1]. При этом следует использовать такие дополнительные способы теплозащиты, которые бы не слишком усложняли конструкцию камерн и технологию ее изготовления.

Так, например, если не обеспечивается об- щий теплосъем, то можно использовать сопловой насадок без регенеративного охлаждения, увеличить расход охладителя (в ЭРД на топливе $H_2 + O_2$ с дожиганием), применить теплоизолирующие покрытия, завесное охлаждение или регенеративное охлаждение обоими компонентами.

При невыполнении условий обеспечения местного теплосъема кроме уже указанных мероприятий используют способы, интенсифицирующие теплосъем охладителем (увеличение W_x путем уменьшения зазора между стенкой и рубашкой, применения спирального оребрения [2], развития теплоотдающей поверхности изменением оребрения или увеличения турбулизации потока созданием соответствующей шероховатости этой поверхности).

Если же не выполняется условие обеспечения прочности стенки, то наряду с указанными выше способами можно уменьшать толщину стенки или выбрать для нее более теплопроводный материал.

Рассмотрим порядок расчета систем теплозащиты при использовании некоторых дополнительных способов повышения ее эффективности.

Применение одностенного соплового насадка. В конце расширяющейся части сопла плотность теплового потока от газа в стенку у сопла большого расширения обычно невелика. Поэтому этот участок стенки можно защитить с помощью радиационного охлаждения, используя сопловой насадок [3].

При расчете теплозащиты соплового насадка надо иметь в виду, что плотность теплового потока от газа в стенку, который можно снять с помощью радиационного охлаждения, не превышает $0,8 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$. Учитывая, что для тугоплавких сплавов $T_{стг} \leq 1800 \text{ К}$, начало соплового насадка следует располагать в сечении сопла, в котором при регенеративном охлаждении $QS \leq 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$. При этом желательно, чтобы длина насадка составляла не менее 0,4 от длины расширяющейся части сопла, иначе его применение будет экономически невыгод-

ным (высокая стоимость металла, сложная технология изготовления).

Расчет теплозащиты насадка, охлаждаемого излучением тепла, проводится по методике, изложенной в пособии [1].

Порядок расчета должен быть следующим:

выбрать сечение, в котором по машинному расчету при T_H
 $Q_5 \leq 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м²;

выбрать материал для изготовления насадка и определить для него $T_{cг}$ [1];

произвести пересчет величины плотности конвективного теплового потока (см. предыдущий расчет). Координаты первой точки зависимости

$$\frac{q_{к2}}{q_{к1}} = f_1(T_c) \text{ будут}$$

$$T_{c1} = T_{c.p} = T_H \quad \text{и} \quad \frac{q_{к2}}{q_{к1}} = \frac{Q_{K1}}{Q_{K1}} = 1,$$

а второй точки —

$$T_{c2} = T_{c.g} \quad \text{и} \quad \frac{q_{к2}}{q_{к1}} = \frac{\gamma_2(T_r^* - T_{c.g})}{\gamma_1(T_r^* - T_{c.p})}$$

При этом $T_r^* = T_K$ (из исходных данных расчета регенеративного охлаждения). Величины γ_1 и γ_2 определить в зависимости от K , Δ^2 и θ по графикам [18];

в оординатах $q = f(T_c)$ по полученным данным построить прямую $q_r = f_1(T_c)$;

на этом же графике построить кривую зависимости $q_{л.х} = f_2(T_c)$;

✓ при нанесении специального покрытия, увеличивающего степень черноты наружной поверхности насадка, можно принять $\epsilon_{с.х} = 0,9$;

точка пересечения линий соответствует равновесной температуре стенки, которая должна быть меньше $T_{c.g}$.

Температура охладителя на выходе из тракта охлаждения уменьшится на величину его подгрева на участке, замененном сопловым насадком.

Использование теплоизолирующего покрытия. Свойства некоторых теплоизолирующих покрытий приведены в пособии [1]. Наиболее часто для этой цели используют двуокись циркония ZrO_2 .

Если коэффициенты линейного расширения α покрытия и метал-

да отличаются друг от друга, то при значительной толщине покрытия и нагреве до высокой температуры будет происходить его растрескивание и отслоение от стенки. Поэтому толщину покрытия выбирают менее 0,5 мм, а на внутренней поверхности стенки предварительно наносят металл, имеющий среднюю величину α между α стенки и α покрытия, и последнее становится двухслойным. Однако при расчете промежуточный слой можно не учитывать.

Целью расчета является определение толщины покрытия, при котором выполнялись бы условия надежности регенеративного охлаждения.

В приближенном расчете принимают, что коэффициент теплоотдачи от газа в стенку ($\alpha_g = ALG$), коэффициент теплоотдачи от стенки в охладитель ($\alpha_x = AL$), плотность лучистого теплового потока от газа в стенку ($q_{г.г} = QR$) и температура охладителя ($T_x = TL$) при нанесении покрытия не изменяются.

Расчет проводят для критического сечения сопла в следующем порядке: выбирают вид покрытия, его теплопроводность и допустимую температуру его горячей поверхности $T_{п.г.г}$ [I]. Если $T_{п.г.г} \geq T_r^*$, то принимают $T_{п.г.г} \leq T_r^* - (100...200)$ К.

При наличии покрытия плотность теплового потока в стенку

$$q_{г.п} = \alpha_g (T_r^* - T_{п.г.г}).$$

Из условия передачи тепла в охладитель

$$q_{г.п} = \alpha_x (T_{с.х.п} - T_x)$$

определяют температуру холодной поверхности стенки при наличии покрытия:

$$T_{с.х.п} = \frac{q_{г.п}}{\alpha_x} + T_x.$$

Если $T_{с.х.п} > T_{с.х.г}$, то необходимо использовать покрытие с более высоким значением $T_{п.г.г}$ или с меньшей λ_n , или, наконец, снизить T_r^* установкой завесы.

Затем находят температуру горячей поверхности стенки при наличии покрытия

$$T_{с.г.п} = T_{с.х.п} + q_{г.п} \frac{h_c}{\lambda_c}$$

и толщину покрытия

$$h_n = \frac{\lambda_n}{q_{г.п}} (T_{г.г} - T_{с.п}).$$

Если условие $h_n \leq 0,5$ мм не выполняется, но имеется запас по $T_{с.п} < T_{с.г}$, то, приняв $T_{с.п} = T_{с.г}$, можно последовательно определить $q_{г.п}$, $T_{с.п}$, $T_{г.г}$ и новую толщину h_n .

Так как подогрев охладителя при прочих равных условиях пропорционален величине теплового потока, то новое его значение можно определить весьма приближенно из соотношения

$$\Delta T_{хр} = \Delta T_{кр} \frac{q_{г.п}}{q_{г.р}}$$

где $q_{г.р}$ — плотность теплового потока в рассматриваемом сечении до нанесения покрытия;

$\Delta T_{хр}$ — подогрев охладителя в тракте охлаждения до нанесения покрытия.

Если после расчета выполняются все условия надежности охлаждения, то расчет следует считать законченным. Полученная толщина покрытия сохраняется на всем участке стенки, где раньше не выполнялись условия надежности охлаждения.

При невыполнении этих условий следует, изменяя h_n или заменяя вид покрытия (см. табл. 4.2 пособия [1]), добиться получения необходимого эффекта. В некоторых случаях это не удается, и тогда следует использовать завесное охлаждение.

Расчет системы при использовании завесного охлаждения. Конструкция поясов завесы и общие положения по расчету завесного охлаждения изложены в работах [1, 3]. Пояс завесы располагают в начале участка стенки, на котором характерные температуры системы регенеративного охлаждения превышают допустимые величины. При этом принимают допущение, что после пояса завесы температура пристеночного слоя $T_{г.з}^*$ будет постоянной до конца камеры или до следующего пояса завесы.

Расчет проводят для критического сечения сопла в следующем порядке.

Расчитать температуру газа в пристеночном слое $T_{г.з}^*$ после завесы из условия теплового баланса

$$\alpha_r (T_{r3}^* - T_{c.r.0}) = \alpha_{x.0} (T_{c.x.0} - T_x),$$

откуда

$$T_{r3}^* = \frac{\alpha_{x.0} (T_{c.x.0} - T_x)}{\alpha_r} + T_{c.r.0}.$$

При наличии теплоизолирующего покрытия вместо $T_{c.r.0}$ необходимо в формулу подставить $T_{п.г.}$.

По величине T_{r3}^* , используя [5], найти необходимое соотношение компонентов топлива в пристеночном слое после завесы K_{m3} .

Определить расход горючего на завесу \dot{m}_3 [15]:

$$\dot{m}_3 = \frac{K_{mc} - K_{m3}}{K_{m3} (K_{mc} + 1)} \dot{m}_c,$$

где K_{mc} - массовое соотношение компонентов в пристеночном слое до постановки завесы;

\dot{m}_c - расход топлива в пристеночном слое.

Определить удельный импульс тяги камеры при наличии завесы по формуле

$$J_{y.3} = \frac{\dot{m}_g J_{y.g} + (\dot{m}_c + \dot{m}_3) J_{y.3}}{\dot{m}_r + \dot{m}_3},$$

где \dot{m}_g - расход газа в ядре потока газа;

$J_{y.g}$ - удельный импульс тяги в ядре потока, м/с;

$J_{y.3}$ - удельный импульс тяги в пристеночном слое газа после завесы;

\dot{m}_r - расход топлива через головку.

Вычислить потерю J_y вследствие установки завесы

$$\Delta J_y = J_y - J_{y.3}.$$

Выразить в процентах от расхода топлива через головку относительный расход на завесу

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_r} \cdot 100 = \dots$$

и сравнить результат со статистическими данными [1].

В начале расчета системы проточного охлаждения была принята схема течения охладителя с вводом его в тракт охлаждения на срезе сопла камеры. В конце расчета следует выбрать более оптимальную схему течения охладителя на основании рекомендаций пособия [3].

Необходимо также определить размеры проходных сечений трубопроводов, фланцев, штуцеров и коллекторов, через которые компоненты топлива подводят в камеру.

Величина гидравлических потерь давления охладителя в тракте была выбрана при выполнении работы [8].

3.2.2. Конструирование камеры двигателя с учетом современной технологии ее изготовления

В девятом семестре студент должен сконструировать камеру проектируемого двигателя. Ориентируясь на уже изученные конструкции, чертежи камер, имеющиеся на кафедре, а также пользуясь рекомендациями пособий [2, 3], он выбирает схемы силовых систем основных сборочных единиц (смесительной головки и корпуса камеры) и производит их конструктивную разработку. Она заключается в членении основных сборочных единиц (СЕ) на более простые^I, а последних — на детали, в выборе формы и материала деталей, вида их соединений, технологии изготовления, и в расчете прочности элементов, входящих в силовую систему СЕ.

Деление камеры на сборочные единицы обусловлено:

различной конструкцией и технологией изготовления отдельных частей камеры;

необходимостью их отдельных испытаний;

отсутствием оборудования для изготовления крупногабаритных конструкций;

необходимостью установки поясов завесного охлаждения;

требованием высокой технологичности изготовления.

Принцип работы камеры ЖРД сформулировал К.Э.Циолковский еще в 1903 г. в работе "Исследование мировых пространств реактивными приборами". Он предлагал сжигать топливо в камере при давлении в

^I Так, например, смесительную головку камеры делят на форсуночный блок, наружное днище и корпус, а корпус камеры — на среднюю и сопловую части [3].

несколько тысяч атмосфер, а затем разгонять полученный газ в плавно расширяющемся сопле, простиравшемся на всю длину ракеты. Для сохранения в целостности конструкции он предусматривал охлаждение стенки камеры жидким компонентом топлива (водородом), пропуская его по тракту охлаждения, образованному стенкой и рубашкой корпуса камеры.

Идеи, высказанные К.Э. Циолковским, послужили основой для начала практических работ по решению задачи создания камер в начале 30-х годов. Камеры обычно имели цилиндрическую камеру сгорания с небольшим числом форсунок и коническую расширяющуюся часть сопла. Теплозащита стенки камеры обеспечивалась с помощью емкостного охлаждения в комбинации с теплоизолирующим покрытием, внутреннего охлаждения, или же использования регенеративного охлаждения. В последнем случае камера имела двухстенный корпус с несвязанными по поверхностям стенками. Типичными представителями таких камер являлась камера КРД ОРМ-65, разработанная в 1936 году в ракетном научно-исследовательском институте (НИИ).

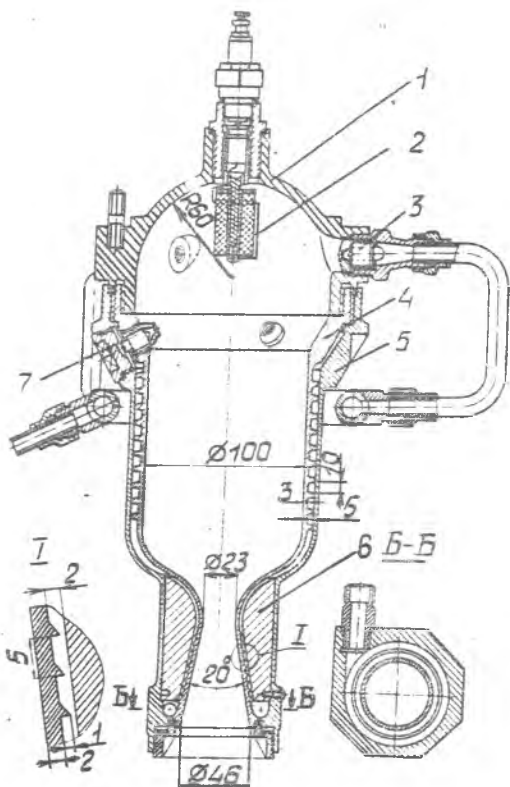
Двигатель работал на азотной кислоте и керосине при давлении газа в камере до 2,5 МПа и тяге до 1,75 кН при $V_{изл} = 2150$ м/с. Он устанавливался на ракетоплане РП-318-1 и крылатой ракете 212 конструкции С.П. Королева.

Камера двигателя (рис. 4) была изготовлена из стали и имела форсуночную головку 1 с тремя центробежными форсунками горячего 3 и корпус, состоящий из стенки 4 и рубашки 5. В верхней части корпуса стенка, рубашка и головка соединялись резьбой с уплотнением стыка алюминиевой прокладкой. Охлаждение стенки - регенеративное. Окислитель входил в тракт охлаждения через коллектор у среза сопла (сечение Б-Б) и по винтовым канавкам, образованным алюминиевым разрезным вкладышем 6 и стенкой, а затем - стенкой и рубашкой, поступал в три центробежных форсунки 7. У среза сопла стенка и рубашка могли перемещаться относительно друг друга в осевом направлении в результате различной термической деформации. Для уплотнения стыка применяли свинцовую прокладку, прижимаемую резьбовым кольцом. При удлинении стенки во время работы камеры свинец вытекал в кольцевой зазор, образованный рубашкой и резьбовым кольцом. Для начального воспламенения топливной смеси в камере сгорания в центре головки было установлено пирозажигательное устройство 2.

Недостатком таких камер было малое число форсунок, что не позволяло получать хорошее смешение компонентов топлива. Кроме того, стенка и рубашка, работавшие независимо, по условиям прочности должны были иметь значительную толщину, что приводило к увеличению массы камеры и к трудности охлаждения стенки при увеличении давления более двух МПа.

В 1946 г. в КБ А.М.Исаева была разработана сварная камера из листового материала [3]. Головка камеры имела плоский форсуночный блок с большим числом однокомпонентных форсунок, а сошло - профилированный контур, который позволял при меньшей длине обеспечить ту же степень расширения газа. Поэтому камеры имели меньшую удельную массу не только вследствие более тонких стенок, которые совместно воспринимали давление газа в камере, но и вследствие более короткого сопла.

Разработка такой конструкции показала возможность создания камеры с жестко связанными по боковым поверхностям деталями, которая ранее не рассматривалась в связи с опасениями разрушения из-за появления больших термических напряжений при неодинаковом нагреве стенки и рубашки. Связи между средним и внутренним днищами, а также рубашкой и стенкой подставляли собой круглые выдавки (выштамповки) ди-



Р и с. 4. Камера двигателя ОРМ-65

аметром до 10 мм, расположенные равномерно по поверхности внешних деталей с шагом до 20 мм. Сварные камеры успешно использовались при давлениях P_K до 4 МПа. Однако при больших давлениях все сильнее начали проявляться их недостатки [3].

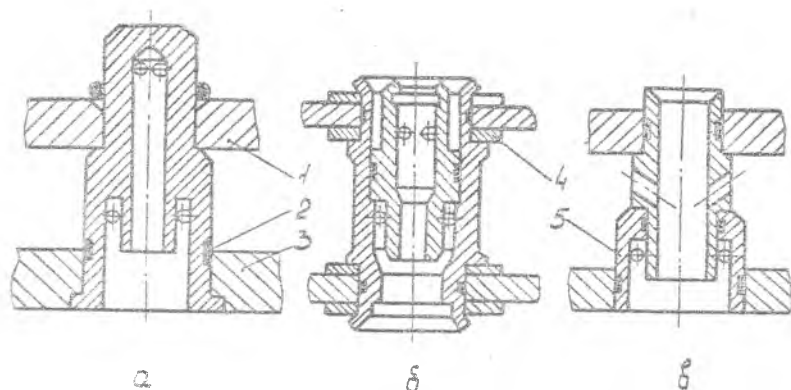
В 1954 г. в КБ В.П.Глушко были созданы конструкции и технология изготовления паяно-сварных камер, которые применяют и в настоящее время. Камеры изготавливают в основном из листового материала, но для соединения их деталей и сборочных единиц используют пайку и сварку [3]. Пайка позволяет изготавливать 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. Как и сварные камеры, они состоят из двух основных сборочных единиц — смесительной головки и корпуса.

Схема и порядок проектирования паяно-сварной головки приведены в пособии [3]. Ниже изложены некоторые рекомендации по конструированию ее элементов и технологии изготовления.

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.

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. 5, а). При этом припой не растекается по поверхности днища, а проникает в зазор между форсункой и днищем.



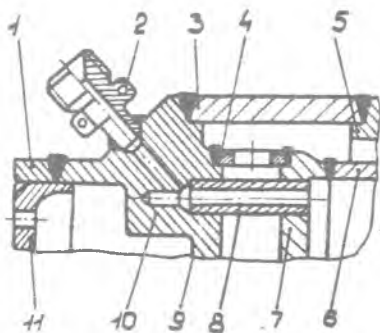
Р и с. 5. Схемы соединения форсунок с днищами головок при достаточной (а, в) и недостаточной толщине днищ (б): 1 - среднее днище, 2 - колечко припоя, 3 - внутреннее днище, 4 - прокладки из более мягкого металла, 5 - малорасходная форсунка

Ширина паяного шва по условию прочности соединения должна быть не менее 3 мм. 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. 5, 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 для увеличения прочности соединения днищ по периферии они приварены к кольцу с радиальными отверстиями, через которые охладитель поступает в их внутреннюю полость (рис. 6).

В головках типа "газ-жидкость" для улучшения охлаждения внутреннего днища используют дефлектор (дополнительное днище), установленный в полости между внутренним и средним днищами (рис. 7). Один из способов крепления дефлектора показан на рис. 8. Охладитель, поступающий в полость между внутренним днищем и дефлектором, через



Р и с. 6. Схема соединения головки с корпусом камеры: I - 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, II - газораспределительная решетка

форсуночный блок устанавливает в контейнер, который заваривают. Через два штуцера контейнер продувают нейтральным газом, а затем заваривают в эти штуцеры. Это необходимо для того, чтобы не было окисления припоя при пайке. После пайки твердым припоем 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.

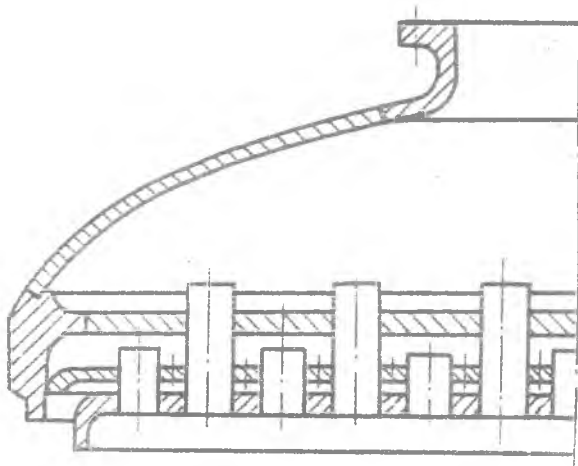
Затем проводят технологические испытания форсуночного блока [3] и, если предусмотрена установка кольца, соединяющего по периферии днища, производят его приварку.

В ранних конструкциях паяно-сварных головок при их диаметре более 0,2 м с целью увеличения изгибной жесткости форсуночного блока среднее днище связывали с наружным днищем с помощью ребер жесткости (кольцевых или радиальных), которые приваривались к днищам

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. 5в) или же сверлений в самом днище.

Сборка форсуночного блока производится в следующем порядке.

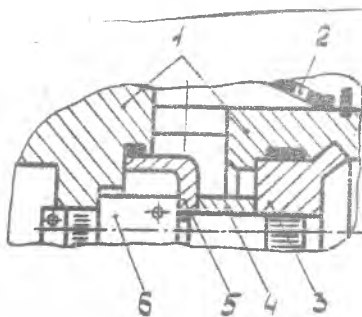
В кольцевые канавки форсунок закладывают колечки припоя, вставляют форсунки во внутреннее днище и одевают среднее днище. Сверху на силовые форсунки также устанавливают колечки припоя. В соответствующем приспособлении



Р и с. 7. Схема головки с дефлектором

с таким расчетом, чтобы не мешать входу компонента топлива в форсунки. При меньших диаметрах эти днища могут быть соединены удлиненными форсунками — штифтами. В более поздних конструкциях среднее днище изготавливают выгнутым с большим радиусом кривизны в сторону внутреннего днища, и оно работает при действии перепада давления на форсунках 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", т.е. к ним нет доступа изнутри для



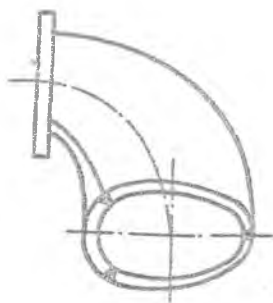
Р и с. 8. Один из способов крепления дефлектора: 1 — корпус головки, 2 — фильтр, 3 — внутреннее днище, 4 — втулка, 5 — дефлектор, 6 — форсунка

зачистки, то их необходимо варить с подкладкой, предотвращающей попадание расплавленного металла внутрь полости. В центре наружного дна обычно приваривают патрубок с фланцем для подвода компонента. При малых расходах компонента может быть использован штуцер.

При установке в центре головки пиро- или электроскорового воспламенителя или узла крепления камеры к летательному аппарату подвод компонента осуществляют через коллектор, приваренный к наружному дну.

В газожидкостных головках наружное дно имеет коническую или расширяющуюся тороидальную форму [3]. Угол конуса или степень расширения тороидального наружного дна выбирают из условия безотрывного течения газа. В тороидальном газоводе, соединяющем турбину с головкой, газовый поток поворачивается и на газ действует центробежная сила. В результате плотность газа и его давление по поперечному сечению газовода и головки будут неодинаковыми. Для

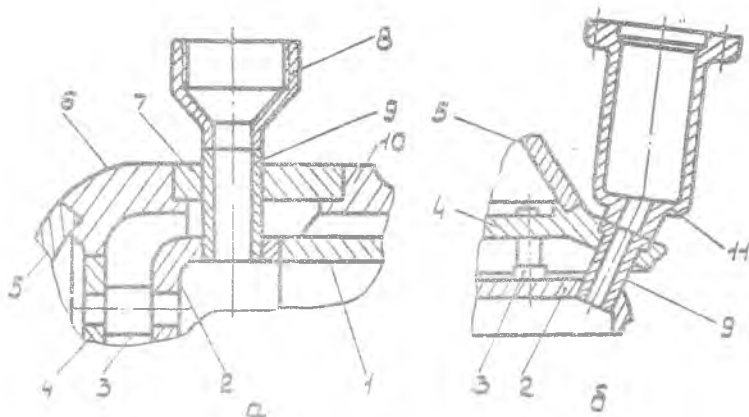
выравнивания поля давления перед форсунками внутри наружного дна устанавливают газораспределительную решетку (см. рис. 6).



Р и с. 9. Схема тороидального наружного дна

У тороидального дна 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. 9).

Если пиро- или электроскоровой воспламенители расположены на головке, то они сообщаются с огневой полостью камеры с помощью трубки, установленной вместо центральной форсунки, или же с помощью втулки (рис. 10,б), вставленной в сверления в корпусе головки и внутреннем дне. В последнем случае для повышения надежности зажигания смеси устанавливают два воспламенителя. У одной из камер пировоспламенитель установлен перпендикулярно оси камеры на соединительном кольце корпуса головки с корпусом камеры (рис. 10,а).



Р и с. 10. Схемы установки воспламенителя: а - на кольце, соединяющем смесительную головку с корпусом камеры; 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

Штуцеры для измерения давления компонентов топлива в полостях головки устанавливают на наружном днище и на кольце, соединяющем корпус головки с рубашкой корпуса камеры. Для фиксации штуцера на нем делается проточка, с помощью которой он вставляется в соответствующее отверстие. Штуцер должен иметь также шестигранный выступ для удержания его ключом при затяжке шишпельного соединения, так как иначе можно разрушить сварку. Штуцер измерения давления газа в камере сгорания устанавливают на корпусе головки, используя для сообщения с огневой полостью камеры втулку, установленную вместо форсунки, и сверление в теле корпуса (см. рис. 6).

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 числовые значения составляют:

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 наружного днища головки (он является базовой деталью при сборке головки с корпусом камеры)	- не более 0,5 и 0,3 мм соответственно.

К о р п у с к а м е р ы (рис. II) 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 заключаются 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);

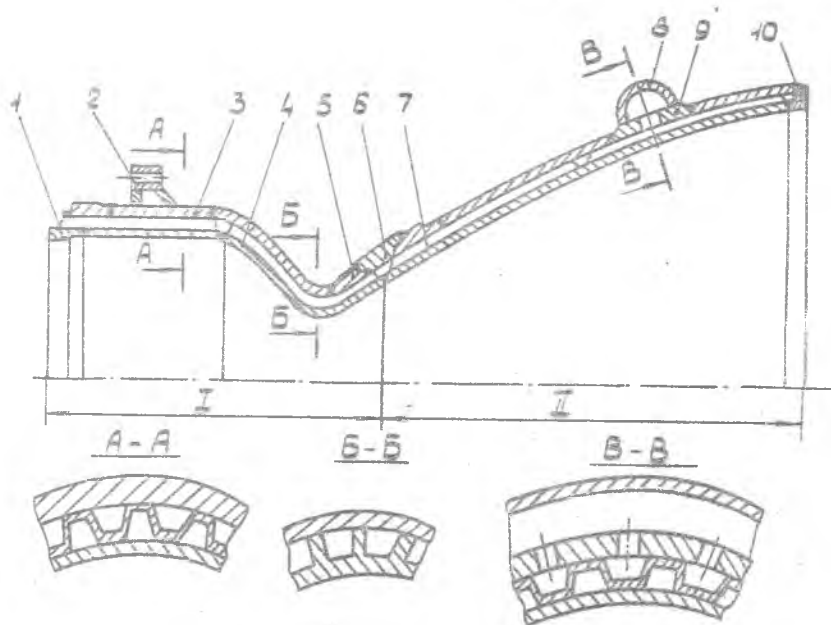
проще проконтролировать качество пайки ребра с рубашкой с помощью рентгенооскопии;

облегчаются условия работы сварного шва между деталями стенки сборочных единиц в зоне критического сечения, так как он сдвигается от этого сечения вправо или влево.

Поэтому 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.

Корпус камеры делят на две и более основные сборочные единицы. Как стенка, так и рубашка сборочной единицы корпуса могут состоять

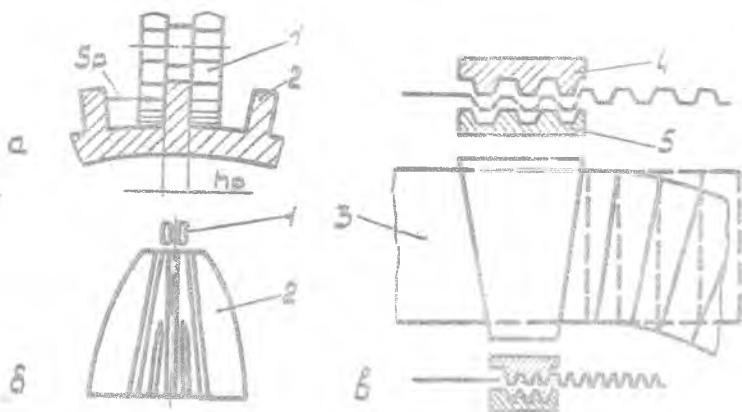
из нескольких деталей, соединенных сваркой, причем после сварки швы обязательно зачищают.



Р и с. II. Схема корпуса паяно-сварной камеры: I — 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

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 участок расширяющейся части сопла вначале имеет цилиндрическую форму (см. рис. 14,а) с внутренним диаметром, равным диаметру критического

сечения. Затем стенку обтачивают до получения заданной толщины. Фрезерование канавки осуществляют парой фрез (рис. 12, в). В том сечении, где эта ширина становится больше максимально допустимой, число ребер удваивают (рис. 12, б). Минимальные диаметр фрез — 40 мм, толщина — 1 мм.



Р и с. 12. Схемы фрезерования канавки 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.

Фрезеруют и винтовые ребра с углом наклона к образующей, равным $15...20^\circ$ — для увеличения высоты ребра, если она меньше минимально допустимой [2].

Если при изменении числа ребер на следующем участке не кратно двум, то в этом месте 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 соседних гофровых проставок.

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. 12, 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].

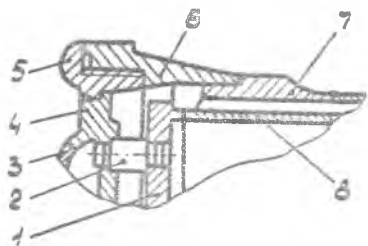
К торцам рубашки приваривают утолщенные переходные кольца (см. рис. 11, поз. 5), которые повышают ее жесткость в местах соединения с другими сборочными единицами. Кроме того, они позволяют устранить появление распая шва между ребром и рубашкой в момент приварки соединительного кольца. Переходное кольцо может быть приварено и к торцу стенки малой толщины — для обеспечения качественного сварного шва стенки с отбортовкой внутреннего днища (см. рис. 11, 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 резьбо-паяное соединительное кольцо, одна деталь которого изготовлена из бронзы, а другая — из титанового сплава. Эти детали соединяются резьбой с последующей пайкой (рис. 13).

К торцу стенки у среза сопла для повышения жесткости приваривают замыкающее кольцо (см. рис. 11, поз. 10).

При сборке деталей рубашки в нее вваривают распределительные кольца коллекторов для ввода охладителя в тракт охлаждения камеры или вывода его из тракта, а снаружи приваривают узлы крепления агрегатов и трубопроводов двигателя, а также узлы крепления камеры к ЛА.

При сварке деталей стенки и рубашки необходимо их сварные швы сдвигать относительно друг друга с тем, чтобы не ослаблялась прочность корпуса.

При сборке средней части камеры под пайку производят подгон-



Р и с. 13. 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 соединительное кольцо, 7 - титановое переходное кольцо рубашки корпуса; 8 - стенка

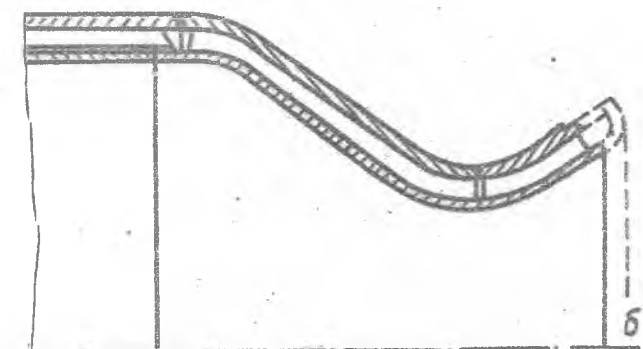
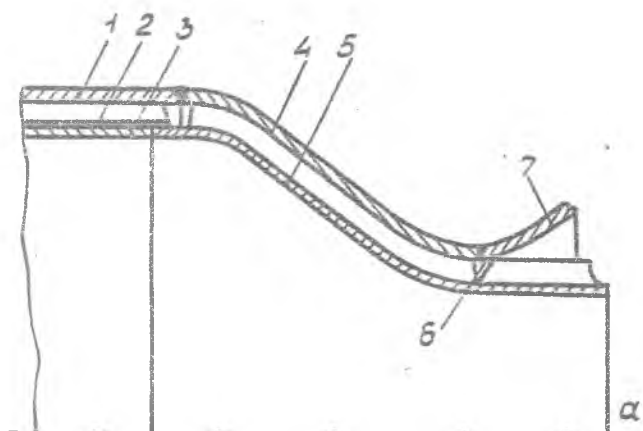
ширяющейся части сопла до получения плотного прилегания ребер к поверхности рубашки (рис. 14). Кольцевая канавка в ребрах предотвращает их выпучивание при больших углах развальцовки стенки в сопле с угловым входом.

В начале этой сборочной единицы 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 охладителя по каналам тракта охлаждения, перекрытым штуцером, ребра или гофры вокруг него необходимо удалить (рис. 15).

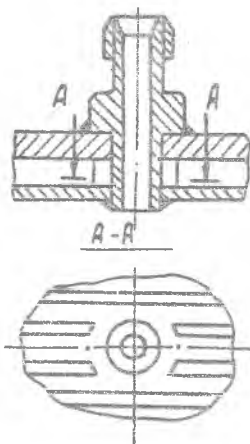
Пояс завесного охлаждения обычно устанавливают на входе в сопло. В зависимости от конструкции [2, 3] его приваривают к деталям стенки и рубашки или изготавливают заодно целое со стенкой.

Следующим этапом подготовки к пайке является развальцовка припусков по торцам стенки и сварка их с рубашкой. Охлаждающий тракт продувают через технологические штуцеры нейтральным газом и после заварки одного из них вакуумируют. Это позволяет не только устранить окисление припоя при пайке, но и плотно прижать ребра или гофры к паяемым деталям для получения прочных швов.

ку 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 надевают рубашку и производят обстукивание стенки в местах непритягания ребер. Затем соответствующие поверхности стенки и рубашки подвергают травлению для удаления с них окислов и загрязнений, наносят припой напылением или в виде листов фольги. После этого производят окончательную сборку и развальцовывают начальный цилиндрический участок стенки расширяющейся части сопла.



Р и с. 14. Положение деталей рубашки и стенки средней части корпуса камеры до (а) и после (б) развальцовки цилиндрического участка стенки: 1, 2, 3 - рубашка, гофрированная прокладка и стенка цилиндрического участка корпуса соответственно, 4, 5 - рубашка и стенка входной части сопла, 6 - кольцевая проточка в ребрах, 7 - рубашка начального участка расширяющейся части сопла



Р и с. 15. Установка штуцера измерения давления газа в камере сгорания на цилиндрическом участке корпуса

Для повышения устойчивости формы сопла при работе его с перерасширением газа устанавливаются кольцевые ребра жесткости и кольцо для крепления донного экрана ЛА, предохраняющего агрегат двигателя от перегрева излучением выходящей газовой струи.

Для повышения устойчивости формы сопла при работе его с перерасширением газа устанавливаются кольцевые ребра жесткости и кольцо для крепления донного экрана ЛА, предохраняющего агрегат двигателя от перегрева излучением выходящей газовой струи.

В рубашку расширяющейся части сопла вваривают корпус (распределитель) коллектора, подводящего охладитель в тракт охлаждения или отводящего из него часть этого расхода по трубопроводам в сборный коллектор, расположенный на цилиндрическом участке камеры. К замыкающему кольцу или рубашке приваривают штуцер для слива жидкости из тракта охлаждения камеры при ее испытаниях или после отложенного запуска.

Затем среднюю часть корпуса устанавливают на приспособление с вращающимся валом и помещают в печь. Вращение паяемой сборочной единицы необходимо для того, чтобы припой не стекал в одно место и не запаивал там часть каналов тракта охлаждения. После пайки и остывания с печью сборочная единица проходит технологические испытания на прочность, герметичность, а после обточки торцов под соединения с другими сборочными единицами — проливку каналов тракта охлаждения, обезжиривание, сушку и клеймение.

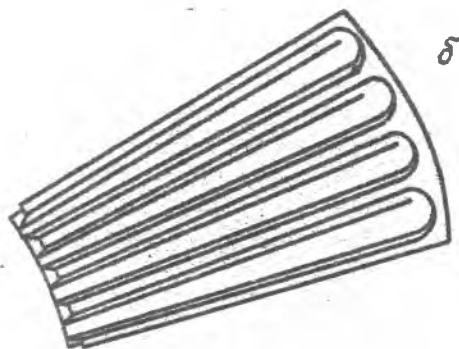
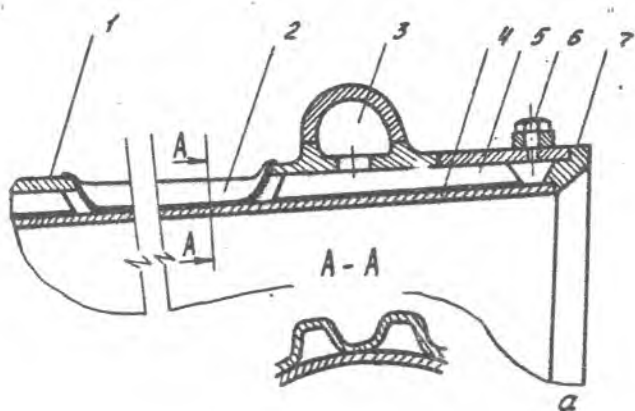
Аналогичным образом изготавливают и вторую сборочную единицу — расширяющуюся часть сопла.

При большой степени расширения сопла для снижения веса вместо гладкой рубашки здесь устанавливали тонкую гофрированную рубашку (рис. 16,а), которую сваривали с остальными деталями по отбортовкам на

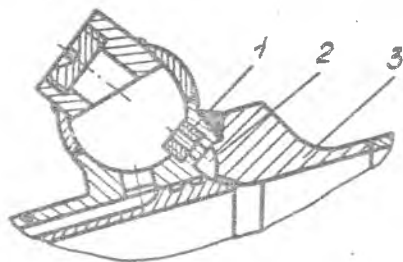
концах (рис. 16,б). Однако неудобство в эксплуатации (легкость повреждения гофрированной рубашки) привело к тому, что ее в последнее время используют редко. Обычно рубашку расширяющейся части сопла делают из нескольких деталей со ступенчатым уменьшением ее толщины к срезу сопла.

Для повышения устойчивости формы сопла при работе его с перерасширением газа устанавливаются кольцевые ребра жесткости и кольцо для крепления донного экрана ЛА, предохраняющего агрегат двигателя от перегрева излучением выходящей газовой струи.

В рубашку расширяющейся части сопла вваривают корпус (распределитель) коллектора, подводящего охладитель в тракт охлаждения или отводящего из него часть этого расхода по трубопроводам в сборный коллектор, расположенный на цилиндрическом участке камеры. К замыкающему кольцу или рубашке приваривают штуцер для слива жидкости из тракта охлаждения камеры при ее испытаниях или после отложенного запуска.



Р и с. 16. Схема соединения гофрированной рубашки со стенкой и другими деталями (а) и ее вид (б): 1 - рубашка предшествующей части сопла, 2 - гофрированная рубашка, 3 - коллектор, 4 - стенка, 5 - гофрированная проставка, 6 - заглушка сливного штуцера, 7 - замыкающее кольцо



Р и с. 17. Установка пояса завесы на стыке охлаждаемой регенеративно и одностенной части сопла: 1 - жиклер для регулирования расхода охладителя на завесу, 2 - коллектор завесы, 3 - переходное кольцо одностенного насадка

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 располагает пояс завесы (рис. 17).

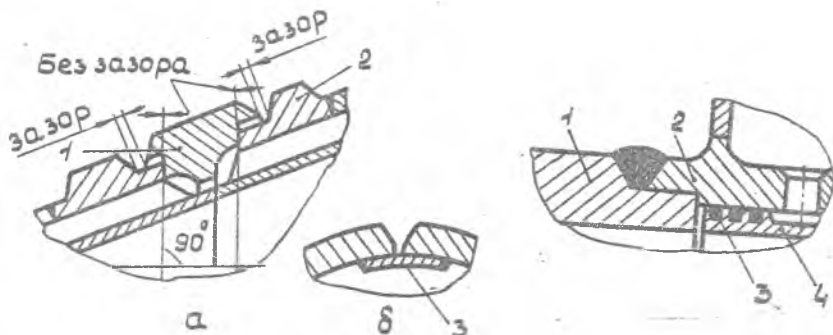
Основные технические требования на изготовление корпуса приведены в пособии [3]. Ниже приведены некоторые числовые величины, указываемые в них для одной из камер, например, допуска на:

толщину стенки, мм	$-(0,1...0,15)$;
толщину ребра, мм	$\pm(0,1...0,15)$;
высоту ребра, мм	$\pm(0,15...0,20)$;
шаг ребра, мм	$\pm 0,15$;
диаметр критического сечения сопла	по 10, II квалитетам;
диаметр среза сопла	по 13-16 квалитетам;
некруглость диаметров критического сечения и среза сопла	$(25-50)\%$ от допуска на размер.

Затем производят сборку камеры [3]. Базовой сборочной единицей является охлаждаемая регенеративно расширяющаяся часть сопла, базами сборки - ось сопла и его срез. Ее устанавливают на вращающей 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 (разъемных или сплошных), привариваемых к переходным кольцам. После сварки стенок возникает необходимость в токарной обработке торцов переходных колец рубашки, так как при сварке может возникнуть поводка стенки, 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 и может разрушиться сварной шов между концами стенок. Плоскости торцов соединительного и переходных колец должны быть перпендикулярны оси камеры, иначе соединительное кольцо нельзя будет вставить (рис. 18, а).

Продольные швы между концами соединительных полуколец необходимо варить с подкладкой (рис. 18, б).



Р и с. 18. 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

Р и с. 19. Соединение головки с корпусом камеры при установке коллектора вывода охладителя: 1 - корпус головки, 2 - корпус коллектора, 3 - припой, 4 - стенка корпуса камеры

Подобным же образом присоединяют к корпусу смесительную головку. Если необходимо установить коллектор на выходе из тракта охлаждения корпуса, то можно использовать решение, приведенное на рис. 19. После каждого соединения сборочных единиц проводят их технологические испытания.

Крепления камеры к ДА, если они не были ранее присоединены к головке или корпусу камеры, привариваются в специальном стапеле.¹ Затем камеру промывают, сушат, клеймят, заглушают все отверстия, контрят резьбовые соединения, а перед постановкой заглушки в критическом сечении сопла внутрь камеры сгорания закладывают мешочек с силикагелем (осушителем).

¹ При необходимости их дополнительно обрабатывают (цапфы - обтачивают, в кронштейнах сверлят отверстия и фрезеруют поверхности, прилегающие к раме двигателя).

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 0,05мм;
неперпендикулярность торцов кронштейнов оси камеры на длине 100 мм	не более 0,05мм

Для поворотных камер:

неперпендикулярность осей цапф оси камеры на длине 100 мм	не более 0,05мм ;
несоосность осей цапф	не более 0,1 мм;
непересечение осей цапф с осью камеры	не более 0,1 мм;
испытать на прочность давлением	МПа по ТУ
испытать на герметичность давлением	МПа по ТУ
пролить камеру по ТУ	;
промыть, обезжирить, просушить по ТУ	;
все отверстия заглушить по ТУ	;
транспортировать в вертикальном положении.	

3.2.3. Расчет статической прочности элементов камеры

Одновременно с конструированием деталей и сборочных единиц камеры студент должен выбрать материал для изготовления и рассчитать их статическую прочность.

При выборе материала деталей следует руководствоваться пособиями [3, 7].

Общие вопросы прочности элементов камеры двигателя и метопики расчетов приведены в пособии [1]. Следует помнить, что расчеты делают на проектировочные и поверочные. Поверочные расчеты проводят в том случае, если размеры деталей заданы или определены ранее, исходя из каких-либо соображений. При проектировочном расчете

задаются рекомендованным коэффициентом запаса прочности и определяют необходимые размеры детали.

Расчет прочности смесительной головки камеры включает в себя расчет прочности блока днищ, наружного днища и его фланцевого соединения [2]. Ввиду большого числа форсунок нагрузка на них будет велика, поэтому прочность форсунок и их пайки можно не считать.

Расчет общей прочности корпуса может быть произведен вручную или на ЭВМ. При расчете вручную вначале необходимо определить изменение величины осевой силы по длине камеры [1] и найти ошибку, возникающую вследствие принятых допущений. Для этого нужно из величины тяги, на которую проектируется двигатель, вычесть тягу, полученную в данном расчете, и разделить на первую величину. При правильном расчете ошибка не должна превышать 5%.

Затем рассчитывается толщина рубашки в предположении, что стенка работает на сжатие в пластической области деформаций. В курсовом проекте расчет проводят по двум сечениям – на цилиндрическом участке за поясом креплений (в сторону сопла) и за разъемом сборочных единиц корпуса. Расчет следует представить в табличной форме.

Определение осевой силы и расчет прочности рубашки сопла может быть проведен на ЭВМ по программе *COPLOS*. В этой программе использован тот же алгоритм математического описания профиля сопла, что и в программе расчета проточного охлаждения. Осевую силу находят в предположении, что крепления камеры расположены на головке или в цилиндрической части (при $X \geq X_5$, см. рис. 3).

Для расчета необходимо по запросам дисплея последовательно ввести данные, часть которых уже использовалась в расчете теплозащиты стенки:

$X_2, X_3, X_4, X_5, Y_0, Y_2, Y_3^*, R_1, R_2, R_3, ALPHA,$
 $PK, K, N=54.$

Дополнительно вводятся:

$\beta = BETA$ – угол наклона профиля выходного сечения сопла к его оси, град (при профилировании сопла $-\beta_a$);
 $h' = H1$ – толщина стенки сопла, м;

* Y_3 соответствует абсциссе X_5 .

$\delta = T$ - высота щели охлаждающего тракта, м;

$p_a = PA$ - давление газа на срезе сопла, МПа;

$p_n = PH$ - давление окружающей среды, МПа;

$p_x = PG$ - среднее по длине тракта давление охладителя, МПа;

$P = Q$ - заданная тяга камеры, кН;

$\sigma_r^1 = SiB1$ - предел текучести материала стенки, МПа;

$\sigma_r^2 = SiB2$ - предел текучести материала рубашки, МПа (см. приложение 5);

$n_r = NT$ - коэффициент запаса прочности.

Математические выражения, описывающие изменение по длине корпуса камеры некоторых исходных данных, приведены в приложении 6.

Результаты расчета выдаются в виде таблицы на экране дисплея, которая при необходимости может быть напечатана. В таблице помещены координаты сечений, соответствующие им геометрические характеристики оболочки:

$\gamma = \text{ГАММА}$ - угол наклона касательной к профилю сопла;

$r_M = RM$ - меридиональный радиус кривизны стенок сопла, м;

$r_n = RN$ - нормальный радиус кривизны его стенок, м;

$p_r = P$ - давление газа по сечениям сопла, МПа;

$\Delta p = PI$ - перепад давления, действующий на корпус, МПа;

$P_o = POC$ - осевая сила, приложенная в сечениях стенки сопла, Н;

Внутренние погонные силы, возникающие в двухстенной оболочке:

NX - меридиональная, NY - окружная и NE - эквивалентная им, Н/м.

В последнем столбце приводится толщина рубашки $H2$. Так как пределы прочности стенки и рубашки приняты постоянными по длине сопла, значения $H2$ следует рассматривать как приближенные. Однако геометрические характеристики сечений и NX, NY, NE могут быть использованы в последующих уточненных расчетах.

В конце таблицы приводятся значения тяги PQ , полученной из расчета осевой силы, и погрешность ее определения W , возникаю-

шая как в результате аппроксимации отдельных величин, так и в связи с погрешностью расчета размеров сопла в курсовой работе.

Расчитывая местную прочность корпуса камеры, следует иметь в виду, что местная прочность стенки между ребрами была уже обеспечена при расчете обрешения. Поэтому следует рассчитать прочность стенки на кольцевых участках между концами ребер или гофров, прочность гофра (ребра) и его спая со стенкой (рубашкой), прочность коллектора и узлов крепления камеры к ЛА. Результаты отдельных расчетов необходимо сводить в таблицы. Пример оформления расчета приведен в приложении 7, а прочность паяных швов — в приложении 8.

В заключение студент определяет запас устойчивости формы сопла при его работе с перерасширением газа. Этот случай возможен при огневом испытании двигателя в наземных условиях [I].

Очевидно, что после каждого расчета необходимо сделать анализ результатов и вывод.

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

3.2.4. Определение вибрационных характеристик корпуса камеры

Сгорание топлива в камере двигателя всегда сопровождается колебаниями давления, температуры и скорости газа. Амплитуды и частоты этих колебаний зависят от режима работы. Особенно часто возникают колебания при пониженном давлении в камере (во время запуска или работы на режиме минимальной тяги).

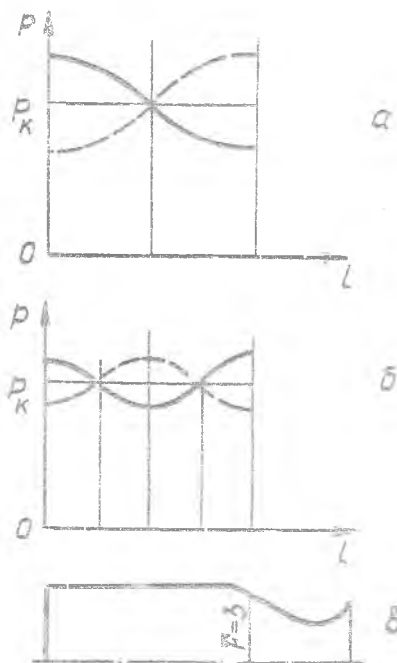
Колебания давления в камере опасны сами по себе, так как увеличивает турбулизацию газа и теплоотдачу в стенку камеры. Кроме того, они могут вызвать резонансные колебания конструктивных элементов камеры и их разрушение. В свою очередь, колебания стенок корпуса могут усиливать колебания давления газов.

В зависимости от частоты различают низкочастотные ($f < 200$ Гц), промежуточные ($f = 200 \dots 600$ Гц) и высокочастотные ($f > 600$ Гц) колебания давления газа в камере.

Низкочастотные колебания характеризуются одновременным изменением давления по всему объему камеры. Причинами возникновения низкочастотных колебаний могут быть случайные изменения расхода топлива в камеру вследствие пульсаций давления компонентов в магистральных подачах. Низкочастотные и промежуточные колебания обычно не являются опасными, так как собственные частоты колебаний элементов камеры значительно выше этих частот.

При высокочастотных колебаниях в камере периодически движутся волны сжатия — разрежения газа. Они возникают при повышении давления газа в отдельных точках камеры вследствие случайных отклонений расхода напряженности, соотношения компонентов или времени задержки воспламенения топлива от своих номинальных значений. Если волны движутся вдоль оси камеры, то колебания носят название продольных. При движении волн поперек камеры колебания называются поперечными. Достигнув головки, сужающейся части сопла или противоположной стенки камеры, волны отражаются, и в результате взаимодействия прямых и отраженных волн в камере образуются так называемые "стоячие" волны. При этом возникают узловые поверхности, на которых давление остается постоянным, и поверхности пучностей, на которых амплитуды колебаний давления достигают максимума. Особенно велики эти амплитуды могут быть в случае резонанса, когда собственная частота колебаний массы газа в камере сгорания совпадает с частотой изменения возбуждающей силы, причем эта сила действует на газ в месте образования пучностей, колебания давления газа и возбуждающей силы совпадают по фазе, а энергия, вносимая возбуждающей силой, больше энергии, рассеиваемой в результате трения частиц газа между собой и о стенки камеры.

Продольные колебания характеризуются тем, что изменение давления газа происходит вдоль камерн сгорания, оставаясь в данный момент времени постоянным во всех точках любого ее поперечного сечения (рис. 20). При этом возникновение колебаний в этом случае заключается в следующем. В результате случайного повышения давления газа в каком-либо поперечном сечении камеры сгорания (например, у головки) возникает волна сжатия, которая перемещается в сторону сопла. При этом скорость ее движения увеличивается, а давление в ней снижается в результате перехода потенциальной энергии в кинетическую. Когда фронт волны достигнет в сужающей час-



Р и с. 20. Изменение p_r при продольных колебаниях газа по первой (а) и второй (б) формам в камере (в) двигателя

давления происходит по поперечному сечению камеры сгорания, оставаясь в данный момент времени постоянным вдоль ее образующей. Поперечные колебания делятся на радиальные и тангенциальные. При радиальных колебаниях волны сжатия распространяются по поперечному сечению одновременно во всех направлениях, а узловые поверхности представляют собой концентрические окружности (рис. 21). При тангенциальных колебаниях по первой форме (рис. 22, а) волны сжатия перемещаются от одной стороны камеры к диаметрально противоположной стороне, а узловая поверхность представляет собой осевую плоскость, перпендикулярную направлению движения волн. При колебаниях по вто-

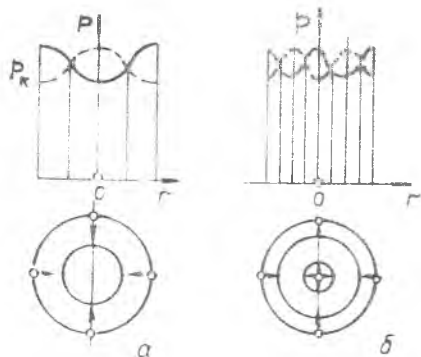
ти сошла сечения с $\bar{F} = 3$, происходит ее отражение, так как при ударе о стенку сопла кинетическая энергия газа переходит вновь в потенциальную. Возникшая в этом сечении волна сжатия начинает движение в сторону головки. Если в момент отражения волны от сопла у головки вновь возникнет волна сжатия, то они, двигаясь навстречу друг другу, в результате образуют стоячую волну.

При упрощенном рассмотрении вопроса можно принять допущение о том, что колебания давления газа происходят по гармоническому закону и его величина изменяется согласно выражению

$$p_r = p_k + \Delta p_k \cos \omega t,$$

где Δp_k - амплитуда колебаний давления газа.

В случае поперечных колебаний изменение



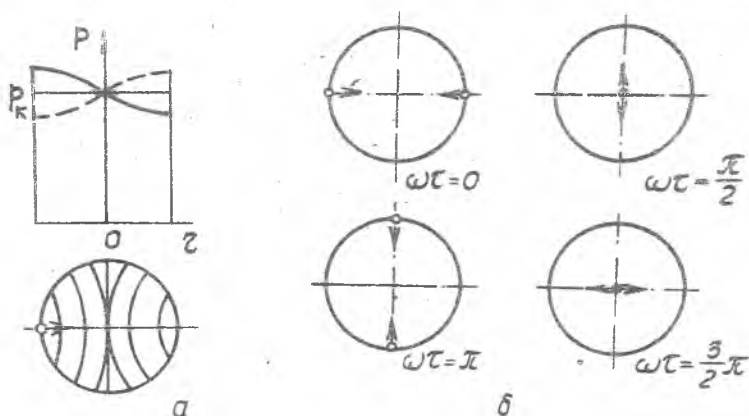
Р и с. 21. Изменение P_r при поперечных колебаниях газа по первой (а) и второй (б) радиальным формам

Расчет собственных частот колебаний

рой форме (рис. 22,б) волны сдвигаются сначала от двух диаметрально противоположных сторон камеры к ее середине, а затем происходит поворот их фронта на 90° и движение от середины к стенкам.

Чаще всего в камерах наблюдается возникновение колебаний по первым формам продольных и тангенциальных высокочастотных колебаний. Однако они всегда сопровождаются колебаниями других частот и форм, поэтому наблюдаемая по осциллограммам картина колебаний будет весьма сложной.

P_r приведен в работе [9].



Р и с. 22. Изменение P_r при поперечных колебаниях газа по первой (а) и второй (б) тангенциальным формам

Основными способами уменьшения амплитуд колебания давления газа в камере являются уменьшение возбуждающих сил, отстройка собственных частот колебаний газа от частот возбуждающих сил, введение демпфирования (поглощения энергии колебаний). При доводке двигателя в случае появления значительных колебаний давления газа в камере использует один из указанных способов или их комбинацию. Чаще всего применяется первый способ, для чего прибегают к изменению процесса смесеобразования — увеличивают перепад давления на форсунках, растягивают фронт пламени. При увеличении перепада давления на форсунках уменьшается влияние изменения давления газа на величину расхода через них. Растягивание фронта пламени путем установки форсунок различной дальности приводит к рассредоточению мест возникновения возбуждающих сил и сдвигает последние по фазе. Отстройка по частоте возможна путем закругления распыла, в результате чего увеличиваются время испарения капель, время задержки воспламенения и частота возбуждающей силы. Если же эти способы не приводят к положительным результатам, то приходится использовать последний способ, самый эффективный, но и наиболее сложный в конструктивном оформлении. В этом случае в магистральных устанавливаются гидравлические демпферы, а в огневой полости камеры — антипульсационные перегородки и акустические резонаторы [3].

Антипульсационные перегородки, разгораживая огневое пространство около внутреннего дна головки, вызывают изменение частот и защищают зону горения от колеблющегося потока газа. Кроме того, при этом наблюдается рассеяние энергии вынужденных его колебаний. При обтекании перегородок потоком газа в полостях, образованных ими, возникает вихри, направление вращения которых изменяется вместе с изменением направления поперечного движения газа. В процессе образования и разрушения вихрей и происходит рассеяние энергии колебаний. Уменьшение же амплитуд колебаний снижает воздействие волн давления на процессы распыливания и смешения компонентов топлива. Наиболее эффективно перегородки снижают амплитуды низких частот поперечных и тангенциальных колебаний давления газа, практически не влияя на амплитуды его продольных колебаний [12].

Акустический резонатор представляет собой небольшую полость, которая через канал соединяется с камерой сгорания [3]. Рассеяние энергии колебаний происходит вследствие движения струи в канале при

ρ - плотность материала кольца;
 U - перемещение элемента кольца;
 h - толщина кольца.

Учитывая, что $N_y = \sigma_y h = E \epsilon_y h = E \frac{U}{r} h$, и подставив значения q_z и N_y в уравнение равновесия, получим

$$\frac{d^2 U}{dz^2} + \frac{E h}{m_n r^2} U = 0.$$

Обозначив $\frac{E h}{m_n r^2} = \omega_0^2$, предыдущее уравнение запишем в виде

$$\frac{d^2 U}{dz^2} + \omega_0^2 U = 0.$$

Данное однородное дифференциальное уравнение является уравнением, выражающим периодическое изменение величины U по времени. Следовательно, ω_0 будет собственной угловой частотой осесимметричных колебаний кольца.

Для длинной оболочки

$$\omega_0^2 = \frac{E h}{(1 - \mu^2) m_n r^2}$$

Для оболочки средней длины при нахождении ее собственных частот колебаний необходимо учесть влияние заделки на концах, т.е. формы колебаний (числа полуволн γ). Так, для одностенной цилиндрической оболочки, шарнирно опертой по торцам, собственные угловые частоты колебаний определяются формулой

$$\omega_0^2 = \frac{E h}{(1 - \mu^2) m_n r^2} (1 + k \lambda^4),$$

где выражения для k и λ имеют тот же вид, что и при расчете устойчивости оболочки.

Для двухстенной оболочки со связанными стенками в данную формулу подставляются соответствующие эквивалентные значения:

$$m_{n,з} = \rho' h' + \rho'' h'' + \rho_{св} \frac{F_{св}}{S} + \rho_x \frac{F_x}{S};$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \frac{Dy}{Ax} ;$$

$$(Eh)_0 = E^0 h - E^1 h^1 .$$

где $F_{сб}, F_x$

— площади поперечного сечения связи и потока охлаждаителя в канале между связями;

$\rho^1, \rho^0, \rho_{сб}, \rho_x$

— плотности материала стенок, связей и охлаждаителя;

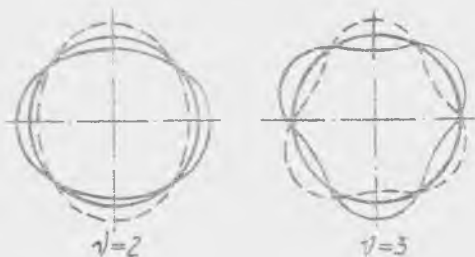
S

— шаг связей.

В последних двух формулах принято $z^1 = z^0$.

При изгибных колебаниях оболочки ее стенки на различных

участках окружности поперечного сечения перемещаются по радиусу в разных направлениях (рис. 25). Поэтому формы изгибных колебаний оболочек средней длины характеризуются как числом полуволн γ , укладывавшихся по длине образующей, так и числом волн $\bar{\gamma}$, укладывавшихся по длине окружности поперечного сечения.

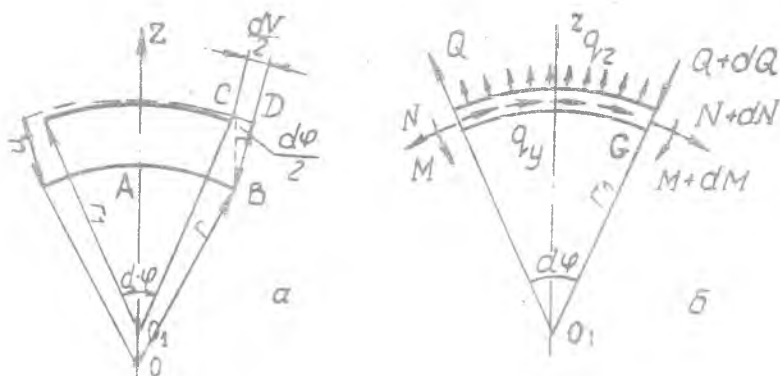


Р и с. 25. Формы изгибных колебаний оболочки: первая ($\bar{\gamma} = 2$) и вторая ($\bar{\gamma} = 3$)

Как и при осесимметричных колебаниях, выведем вначале формулу для определения частоты собственных изгибных колебаний кольца единичной длины. Элемент кольца (рис. 26, а), не находящийся в узле колебаний, будет перемещаться в радиальном направлении и одновременно изгибаться. Изменение кривизны срединной поверхности элемента можно представить в виде двух составляющих.

Первую составляющую, которая возникает вследствие перемещения элемента на величину U , можно записать в виде

$$\frac{1}{z+U} - \frac{1}{z} = - \frac{U}{z^2 + zU} \approx - \frac{U}{z^2} .$$



Р и с. 26. Расчетная схема при определении частоты собственных изгибных колебаний оболочки

так как вторым членом знаменателя с вследствие малости u можно пренебречь.

Вторую составляющую, возникающую вследствие изгиба элемента как бруса малой кривизны, определяют из выражения [16]

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r+u} = - \frac{d^2 u}{ds^2} = - u'' ,$$

где r_1 - местный радиус кривизны;

u'' - вторая производная перемещения по длине дуги ds .

Римскими цифрами обозначены производные по длине дуги ds , в отличие от точек, которые обозначают производные по времени.

Таким образом, суммарное изменение кривизны элемента

$$\mathcal{K} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} = \frac{u}{r^2} + u'' . \quad (1)$$

Отсюда

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} - u'' , \quad (2)$$

$$z_1 = \frac{z^2}{z - u - z^2 u^2}$$

Разложив последнее выражение в степенной ряд и учитывая малость u по сравнению с z , найдем, что

$$z_1 = z + u + z^2 u^2 \quad (3)$$

Откуда

$$z_1^2 = u^2 + z^2 u^4 \quad (4)$$

Вследствие изгиба элемента возникает также перемещение его точек по касательному направлению. Это перемещение можно определить из подобия $\triangle OAB$ и $\triangle BCD$ как

$$\frac{dv}{ds} = -\frac{u}{z} \quad (5)$$

Знак "минус" ставим вследствие того, что из условия нерастяжимости кольца величина u при возрастании ds уменьшается.

Составим теперь уравнения равновесия элемента кольца. При колебаниях (рис. 25, б) на него будут действовать силы инерции, которые направлены не только на нормали (нагрузка q_z), но и по касательной (нагрузка q_y), нормальная сила N , перерезывающая сила Q и изгибающий момент M . Приравняв нулю проекции этих сил на направления нормали к касательной к дуге срединной поверхности элемента, а моменты - относительно точки B и опустив малые величины высшего порядка^I, получим

$$q_z ds - dQ \cos \frac{d\varphi}{2} - 2N \sin \frac{d\varphi}{2} = 0;$$

$$q_y ds - dN \cos \frac{d\varphi}{2} - 2Q \sin \frac{d\varphi}{2} = 0;$$

$$dM - Q ds = 0.$$

^I Величины dN, dQ и $d\varphi$ - бесконечно малые, а их произведения - бесконечно малые высшего порядка.

Произведем преобразования, аналогичные преобразованиям при определении $q_{кр}[I]$ найдем, что

$$q_z - Q^I - \frac{N}{z_1} = 0;$$

$$q_y + N^I - \frac{D}{z_1} = 0;$$

$$M^I - Q = 0.$$

Исключим из первых двух уравнений N . Для этого из первого уравнения найдем N и, дифференцируя его, получим:

$$N^I = z_1^I q_z + z_1 q_z^I - z_1^I Q^I - z_1 Q^{\bar{I}}.$$

Подставим это выражение во второе уравнение системы, найдем, что

$$q_y + z_1^I (q_z - Q^I) + z_1 (q_z^I - Q^{\bar{I}}) - \frac{Q}{z_1} = 0.$$

Подстановка в последнее выражение значения величин из (2)-(4) дает

$$q_y + (U^I + z^2 U^{\bar{I}})(q_z - Q^I) + (z + U + z^2 U^{\bar{I}})(q_z^I - Q^{\bar{I}}) - \left(\frac{1}{z} - \frac{U}{z^2} - U^{\bar{I}}\right)Q = 0.$$

Поскольку величина U мала, то должны быть малы и величины q_z и Q и их производные. Поэтому, пренебрегая величинами высшего порядка малости, получим из предыдущего уравнения с заменой

$$Q = M^I$$

$$q_y + z q_z^I - z M^{\bar{I}} - \frac{M^I}{z} = 0.$$

Но согласно пособию [16]

$$M = EJx,$$

или из (1)

$$M = EJ\left(\frac{U}{z^2} + U^{\bar{I}}\right).$$

Тогда

$$q_y + zq_z^I - 2EJ \frac{U^{\bar{y}}}{z} - zEJu^{\bar{y}} - EJ \frac{U^{\bar{z}}}{z^2} = 0.$$

Ит дифференцируем последнее выражение по S . Тогда

$$q_y^I + zq_z^{II} - 2EJ \frac{U^{\bar{y}}}{z} - zEJu^{\bar{y}} - EJ \frac{U^{\bar{z}}}{z^2} = 0. \quad (6)$$

Величину нагрузок q_y и q_z можно выразить через перемещения точек кольца

$$q_y = -m_n \frac{d^2 V}{dz^2} = -m_n \ddot{V}; \quad (7)$$

$$q_z = -m_n \frac{d^2 U}{dz^2} = -m_n \ddot{U}. \quad (8)$$

При этом первый член уравнения (6) с учетом (7) и (8) запишем в виде [17]

$$q_y^I = \frac{d}{ds} (-m_n \ddot{V}) = m_n \frac{\ddot{U}}{z}. \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (6) и поделив полученное уравнение на $\frac{m_n}{z}$, получим

$$\ddot{U} - z^2(\ddot{U})^I - \frac{EJ}{m_n} z^2 U^{\bar{y}} - \frac{2EJ}{m_n} U^{\bar{y}} - \frac{EJ}{m_n} \frac{U^{\bar{z}}}{z^2} = 0. \quad (10)$$

Решение данного уравнения примем в виде

$$U = T \cos \frac{\nu S}{z},$$

где T - некоторая функция времени;

ν - любое целое число, задаваясь которым, можно получить различные формы колебаний кольца (числа волн, укладывающихся по длине окружности кольца).

Подставив значение U в (6), найдем, что

$$\ddot{T} + \frac{\nu^2(\nu^2 - 1)^2}{\nu^2 + 1} \frac{EJ}{m_n z^4} T = 0. \quad (11)$$

Обозначив

$$\omega_{\text{ц}}^2 = \frac{\nu^2(\nu^2-1)^2}{m_n(\nu^2+1)} \frac{EJ}{z^4},$$

уравнение (II) запишем в виде

$$\ddot{T} + \omega_{\text{ц}}^2 T = 0.$$

Полученное уравнение является уравнением собственных колебаний кольца. Следовательно, $\omega_{\text{ц}}$ является угловой частотой собственных изгибных колебаний кольца.

Если на кольцо действует перепад давления Δp , то, как показано в работе [17],

$$\omega_{\text{ц}}^2 = \frac{\nu^2(\nu^2-1)}{m_n(\nu^2+1)} \left[\frac{\Delta p}{z} + (\nu^2-1) \frac{EJ}{z^4} \right].$$

Очевидно, что положительный перепад (избыток внутреннего давления) вызывает повышение собственной частоты колебаний, а отрицательный (сжимающий) перепад — понижает ее.

При отрицательном перепаде

$$\Delta p = -(\nu^2-1) \frac{EJ}{z^3}$$

частота собственных колебаний обращается в нуль, так как такой перепад равен критическому давлению, вызывающему потерю устойчивости кольца.

Для длинной оболочки

$$\omega_{\text{ц}}^2 = \frac{\nu^2(\nu^2-1)}{m_n(\nu^2+1)} \left[\frac{\Delta p}{z} + (\nu^2-1) \frac{EJ}{(1-\mu^2)z^4} \right].$$

Для оболочки средней длины

$$\omega_{\text{ц}}^2 = \frac{Eh}{m_n z^2 (1-\mu^2)} \frac{(1-\mu^2)\lambda^4 + k(\lambda^2 + \nu^2)^4 + \varphi(\lambda^2 + \nu^2)(\nu^2-1)}{\nu^2 + (\lambda^2 + \nu^2)^2},$$

где $\varphi = \frac{\Delta p z (1-\mu^2)}{Eh}$ — коэффициент, учитывающий влияние давления на частоту собственных колебаний оболочки.

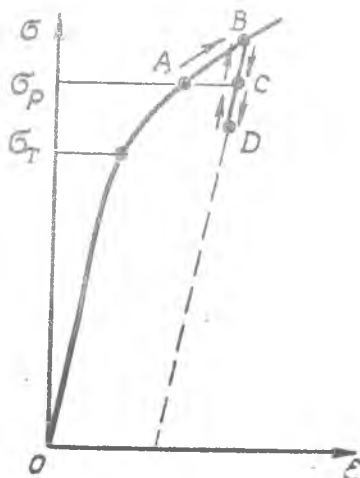
Для двухстенной оболочки со связанными стенками в формулы следует подставить соответствующие эквивалентные величины.

Следует иметь в виду, что в приведенные выше выражения необходимо подставлять значения модулей упругости при соответствующих температурах стенок корпуса, хотя статическое нагружение может привести к работе материала в упругопластической области. Объясняется это тем, что при малых амплитудах колебаний в конце первой четверти их периода напряжение в материале возрастает до величины $\sigma_p + \Delta\sigma$ (рис. 27), где σ_p - значение напряжения при статическом нагружении,

а $\Delta\sigma$ - амплитуда колебаний напряжения. В конце второй четверти периода напряжение снизится до σ_p , а в конце третьей - до $\sigma_p - \Delta\sigma$. В дальнейшем изменение напряжений при колебаниях будет происходить по линии BCD , и, следовательно, деформации и напряжения при колебаниях будут подчиняться закону Гука.

Опасные колебания корпуса камеры могут возникнуть в случае резонанса колебаний давления газа и стенок корпуса. При этом необходимо не только равенство или кратность частоты собственных колебаний стенки частоте пульсаций газа и совпадение колебаний по фазе, но и совпадение формы стоячей волны газа с формой колебаний стенки корпуса.

Так, например, первая форма осесимметричных колебаний корпуса может возбуждаться при радиальных колебаниях или продольных колебаниях давления газа по второй форме. Изгибные колебания оболочки по первой форме могут возбуждаться тангенциальными колебаниями газа по второй форме. Кроме того, изгибные колебания могут возникнуть при параметрическом возбуждении, когда действие возбуждающей силы сводится к периодическому изменению параметров (например, жесткости) колебательной системы.



Р и с. 27. Деформация оболочки при колебаниях

Для устранения опасных колебаний стенок камеры обычно прибегают к уменьшению амплитуд колебаний давления газа. Отстройка частоты собственных колебаний корпуса от частоты возбуждающей силы путем изменения размеров камеры не всегда может дать эффект, так как при этом изменяется и объем газа, что может вызвать появление возбуждающей силы другой частоты. Демпфирование колебаний корпуса связано с увеличением массы камеры.

3.3. Специальное задание

В проект включено специальное задание, предусматривающее более подробную разработку отдельных систем ДУ, оригинальной сборочной единицы, составление рабочих чертежей, проведение нестандартных расчетов.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА

4.1. Графическая часть

При конструктивной компоновке камеры на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 вначале вычерчивают ее газодинамический контур, а затем последовательно разрабатывают конструкцию смесительной головки, корпуса камеры и других элементов. При компоновке камеры следует использовать наиболее простые конструктивные решения. Перед компоновкой необходимо составить план размещения проекций и согласовать его с консультантом.

На миллиметровке должны быть показаны вид сбоку с продольным разрезом верхней половины камеры, вид на нее со стороны головки (для показа угловой координаты элементов конструкции), виды по стрелкам, выносные разрезы и сечения для выявления конструкции отдельных элементов (форсунок и их соединения с днищами, штуцеров, патрубков, коллекторов) и виды их соединений, соединения основных сборочных единиц (вид сечения до и после установки соединительных колец).

При компоновке также прорабатывают вопросы технологии изготовления деталей камеры, ее сборки и испытаний.

При больших размерах камеры допускается:

сдвиг осей линии камеры вниз от линии симметрии бумажного листа с частичным обрывом нижней ее части;

вырвы по длине камеры на участках, где нет изменений в ее конструкции;

вычерчивание вида со стороны головки не в проекционной связи и в масштабе 1:2;

согласование с последним видом поперечных сечений головки с целью показа расположения ребер, форсунок, вида со стороны огневой полости камеры;

выполнение вынесенных элементов в увеличенном масштабе (2:1, 5:1).

После визирования компоновочного чертежа консультантом студент на его основе вычерчивает сборочный чертеж камеры на ватмане с обязательным выполнением требований ЕСКД.

На чертеже должны быть:

проставлены виды сварки и пайки согласно ГОСТ 2.312-68 и 2.313-68 соответственно;

проставлены посадочные, установочные, присоединительные, габаритные, исполнительные и справочные размеры [I], межосевые расстояния отверстий, типы и размеры резьб;

вынесены номера позиций деталей;

выполнены надписи: основная — по ГОСТ 2.104-68 и пояснительная — по ГОСТ 2.316-68.

Пояснительная надпись включает основные технические требования на заключительные операции сборки камеры (сварку головки и кронштейнов узлов крепления камеры к ЛА с ее корпусом), на окончательный контроль ее качества, на подготовку ее 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, термической обработке 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;

указания о маркировке или клеймении;

правила транспортировки и хранения.

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

На отдельном листе формата А4 выполняют спецификацию сборочного чертежа по ГОСТ 2.108-68. В курсовом проекте ее разрешается помещать на сборочном чертеже в правом верхнем углу [13].

4.2. Дополнительная записка

И пояснительная записка должна содержать обоснования решений и расчеты, выполненные только самим студентом. Переписывание материала из книг, журналов, отчетов не допускается — на них делается ссылка. С целью уменьшения объема допускается также ссылка на материалы, помещенные в записках, ранее выполненных по другим дисциплинам. При написании записки пользоваться работами [13, 14].

Основная часть записки должна иметь следующие разделы:

В в е д е н и е (требования к проектируемой ДУ)

1. Функциональное проектирование (принципиальная схема ДУ, циклограмма, функциональные схемы).

2. Компоновочная схема двигателя

3. Конструкция камеры

4. Расчет теплозащиты элементов камеры

4.1. Выбор системы теплозащиты элементов камеры и вида охладителя

4.2. Подготовка данных для расчета системы проточного охлаждения на ЭВМ

4.3. Проектирование оребрения стенки камеры и определение коэффициента эффективности оребрения

4.4. Анализ результатов расчета системы регенеративного охлаждения

4.5. Дополнительные мероприятия для обеспечения надежности теплозащиты элементов камеры

5. Расчет прочности элементов камеры

5.1. Расчет прочности смесительной головки

5.2. Расчет прочности корпуса.

5.2.1. Расчет общей прочности корпуса

5.2.2. Расчет местной прочности корпуса (коллекторов, узлов крепления и фланцев).

5.3. Расчет устойчивости расширяющейся части сопла

6. Зводка материалов, применяемых для изготовления деталей камеры

7. Последовательность сборки камеры

8. Специальное задание

З а к л ы ч е н и е (итоги проектирования и предложения)

Список использованных источников

П р и л о ж е н и я

1. Результаты расчета регенеративного охлаждения камеры

2. Результаты расчета общей прочности корпуса

3. Спецификация камеры

4. Сборочный чертеж камеры

Титульным листом записки является бланк задания, выдаваемого кафедрой. Он же служит обложкой записки.

Посмотрев чертеж и записку, консультант дает отзыв о работе студента в период проектирования и свою оценку проекта, что является основанием для представления проекта к защите.

5. ЗАЩИТА ПРОЕКТА

Защита проекта происходит по расписанию перед комиссией из 2-3 преподавателей, назначаемой заведующим кафедрой. Присутствие консультанта на защите не обязательно, так как его мнение о работе студента отражается в отзыве, изложенном на бланке задания.

Для защиты необходимо записаться не позже чем за день у лаборанта кафедры.

Перед началом защиты члены комиссии просматривают выполненную работу. В течение 5-6 минут студент докладывает о результатах проделанной работы, основное внимание обращая на вопросы, разработанные им самостоятельно. После доклада студенту задают вопросы по всему комплексу работ над проектом. Оценка проставляется по четырехбалльной системе. При оценке проекта учитываются содержание, объем и глубина проекта, степень самостоятельности конструктивной

разработки, правильность принятых решений, качество графического изображения, качество доклада, правильность и полнота ответов на вопросы, оценка консультанта.

Проект оценивается:

"ОТЛИЧНО", если

при разработке конструкции приведены оригинальные решения или проведены самостоятельные исследования;

проект содержит не более 2 мелких ошибок;

ответы на вопросы полные и глубокие;

отзывы консультанта не ниже "отлично".

"ХОРОШО", если

при разработке конструкции даны самостоятельные решения;

ответы на вопросы достаточно полные;

проект содержит не более 5 мелких ошибок;

оценка консультанта не ниже "хорошо".

"УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО", если

при разработке конструкции в основном использована конструкция указанного прототипа, которая студентом усвоена в достаточной мере;

проект не содержит грубых ошибок;

ответы на большинство вопросов правильны;

оценка консультанта не ниже "удовлетворительно".

"НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО" - во всех остальных случаях.

Студенты, получившие неудовлетворительные оценки на защите, а также претендующие на более высокую оценку, допускаются к повторной защите с разрешением декана факультета в сроки, установленные принимавшей защиту комиссией. Повторная защита разрешается в комиссии прежнего состава или в другой комиссии в присутствии одного из членов прежней комиссии.

Библиографический список

1. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Учебн. пособие /Д.И.И и ч у г и н; Куибышев. авиац. ин-т. Куибышев, 1989. 244 с.
2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки" /Г.Г.Г а х у н , В.М.Б а с у л и н , В.А.В о л о д и н и др.; Под ред. Г.Г.Г а х у н а . М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
3. П и ч у г и н Д.Ф. Конструкция и проектирование агрегатов ДДА: Учеб. пособие /Куибышев. авиац. ин-т. Куибышев, 1989. 244 с.
4. К о з л о в А.А. и др. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок: Учебник для студентов авиадвигательных и строительных специальностей вузов /А.А.К о з л о в , В.Н.Н о в и к о в , Б.В.С о л о в ь е в . М.: Машиностроение, 1988. 352 с.
5. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания /Под ред. В.И.Г л у ш к о; АН СССР. М., 1971.
6. Таблицы газодинамических функций /Под ред. Г.С.Р о с л я н о в а ; Москов. гос. ун-т. М., 1974.
7. Выбор материалов для деталей ДДА: Метод. указания к курс. и дипл. проектированию (с приложениями) /Куибышев. авиац. ин-т. Куибышев, 1984.
8. Пояснительная записка к курсовой работе по кафедре "Теория двигателей летательных аппаратов" /Сост. студент гр. 240 И.И.И в а н о в; Куибышев. авиац. ин-т. Куибышев, 1990.
9. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под ред. В.М.К у д р я в ц е в а . М.: Высш. шк., 1976. 856 с.
10. Г у б и н А.М. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1964.
11. А н у р ь е в В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. М.: Машиностроение, 1978. Т. I. 728 с.
12. Неустойчивость горения в АРД /Под ред. Д.Т.Х а р ь е и Ф.Г.Р и р д о н а . М.: Мир, 1975. 870 с.

13. Сборник нормативно-технических и руководящих документов:
Ч. 3. Требования по стандартизации при проведении учебного процесса /Отв. за выпуск А.А.Ткаченко; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 68 с.

14. Оформление студентами текстовых документов при выполнении самостоятельной работы: Метод. указания /Сост. Д.Ф.Пичугин; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1985. 24 с.

15. А л е м а с о в В.Е. и др. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов вузов / В.Е.А л е м а с о в, А.Ф.Д р е г а л и н, А.П.Т и ш и н; Под ред. В.П.Г л у ш к о. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.

16. Ф е о д о с ь е в В.И. Сопротивление материалов. 5-е изд. М.: Наука, 1970. 544 с.

17. Ф е о д о с ь е в В.И. Прочность теплонапряженных узлов жидкостных ракетных двигателей. М.: Оборонгиз, 1963. 212 с.

18. Справочные материалы к курсовому и дипломному проектированию ДЛА /Сост. Д.Ф.Пичугин; Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992.

19. Курс лекций по теории звука /С.Н.Ржевкин. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1960. 335 с.

Некоторые физические свойства охладителей

Охладитель	Нормальные условия			Критические условия			Тразл. К	ζ_s *) $\frac{кДж}{кг}$
	Тпл, К	Ткип, К	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	Ткр, К	$\rho_{кр}, МПа$	$\rho_{кр}, \frac{кг}{м^3}$		
<u>Окислители</u>								
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
<u>Горючие</u>								
Тонка-250	228	188	845	631	3,4	-	-	302
Керосин	220	425	830	673	4,02	-	400	343
Аерозин	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

*) ζ_s при $T_{кип.}$, при $T_{кр}$ $\zeta_s = 0$

Зависимость коэффициента теплопроводности λ , ккал/м·ч·гр, некоторых материалов от температуры

Наименование материала	Температура, °C							$t_{м.с}$	
	0	100	200	300	400	500	600		700
Медь (чистая)	337	331	327	322	315	311	307	-	1080
Алюминий	174	177	197	234	274	319	364	-	649
Алюминиевый сплав АК-4	145	153	162	172	183	195	210	-	-
Бронза хромистая БрХ	288	284	280	276	272	268	264	260	1060
Сталь 08	80	70	60	52	45	38	35	33	1530
Сталь 3Л-1Т (1Х18Н9Т)	13,4	15,5	16,7	17,6	18,5	19,4	20,3	21,3	-
Титан	13,2	13,8	14,4	15,0	15,6	16,3	17,0	-	-
Никель	50,6	50,3	49,2	48,9	47,8	47,5	46,2	48	1450
Ниобий	45	46	49	51	53	55	57	59	-
Вольфрам	150	130	123	117	110	104	99	93	3390
Молибден	121	118	115,5	113	110,5	108	105,5	103	2620

Примечание. При переводе в систему СИ 1 ккал/м·ч·гр = 1,163 Вт/м·К.

Таблица исходных данных для расчета
системы регенеративного охлаждения
корпуса камеры (п р и м е р)

Тр. 262 Иванов А.Н.

$X2 = 1.250$; $X3 = 1.375$; $X4 = 1.375$; $X5 = 1.450$;
 $X6 = 1.771$; $Y0 = 0.755$; $Y2 = 0.069$; $Y3 = 0.171$;
 $R1 = 0.095$; $R2 = 0.138$; $R3 = 0.031$; $ALPHA = 48.$; $K = 1.23$;
 $TSH = 800.$; $TK = 2556.$; $TKR = 3623.$; $ECT = 0.8$; $PHO = 0.399$;
 $PCC = 0.$; $PK = 15.$; $VL = 19.58$; $TLB = 20.$; $TLD = 1000.$;
 $A1 = 0.0$; $B1 = 13.53$; $A2 = -0.051$; $B2 = 55.$; $A3 = 1.2$;
 $B3 = 1200.$; $HS = 0.001$; $u = 0.29$; $THD = 800.$; $TD = 600.$;
 $WD = 300.$; $CP = 4371.1$; $ET = 0.677E-04$; $VS = 97.9$; $N = 40.$

Прочностные свойства некоторых материалов, используемых для изготовления деталей: кг/см² [7]

Наименование	Марка	σ_B при температуре, К									
		20	77	203	293	573	673	873	973	1073	1173
Не ржавеющая сталь	12Х18Н9Т	1850	1750	1190	620	460	450	400	400	280	150
Хромоникелевая сталь	Х16Н6	2000	1800	1450	1100	1070	800	430	-	-	-
" "	2Х18Н12С4ТМ	1800	1500	1160	900	750	730	620	-	-	-
Титановый сплав	BT-20	1450	1400	1200	950	750	650	450	-	-	-
Бронза хромистая	BrXO,8	-	-	-	300	250	200	140	120	80	-
Бронза циркониевая	BrЦр0,4	-	-	-	400	350	200	150	-	-	-

П р и м е ч а н и я: 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. Полуфабрикаты - листы, прутки, трубы.

Аппроксимация некоторых величин, используемых при расчете общей прочности корпуса камеры

1. Аппроксимирующие формулы для расчета давления газов в сечениях сопла:

Давление в сечении i равно

$$p_i = \frac{p_k}{\pi}$$

где

$$\pi = f(B, k),$$

$$B = \frac{F_i}{F_*}$$

где F_i и F_* - площади поперечного сечения сопла в i -м и критическом сечениях.

В сужающейся части сопла

$$\pi = \frac{c-dB}{e-fB}$$

В расширяющейся части сопла

$$\pi = mB^n$$

Значения постоянных приведены в таблице.

k	c	d	e	f	m	n
I, I...I, I8	I,27	I,47	I,3I	I,42	3,7	I,26
I, I8...I, 28	I,37	I,5	I,34	I,4I	4,3	I,33
I, 28...I, 4					4,84	I,4I
I, 4...I, 5	I	I,07	0,97	I,0I	5,77	I,4I

2. Уравнения, определяющие величину геометрических характеристик в сечениях сопла по его длине:

$$z_H = y \frac{1}{\cos \beta}$$

$$z_M = \frac{\left[1 + \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2 y}{dx^2}} ;$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{dy}{dx} .$$

Для параболического участка расширяющейся части сопла

$$z_H = \frac{1}{2A} \left[(2Ay + B_1)^2 + 1 \right]^{3/2} ;$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{1}{2Ay + B_1} ,$$

где

$$A = \frac{\operatorname{ctg} \alpha (y_4 - y_5) - (x_4 - x_5)}{(y_4 - y_5)} ;$$

$$B_1 = \frac{2y_4(x_4 - x_5) - \operatorname{ctg} \alpha (y_4^2 - y_5^2)}{(y_4 - y_5)} .$$

Значения величин, входящих в A и B , определяются по рис. 3.

Пример оформления расчета прочности
элемента конструкции

Расчет прочности ребра стенки корпуса камеры ЖРД проведен по методике, изложенной в пособии [1].

1. Расчетный режим – режим запуска в момент времени перед воспламенением топливной смеси в камере сгорания, так как перепад давления, действующий на стенку, в этом случае больше, чем на основном режиме.

2. Вид нагружения – растяжение.

3. Расчетная схема – стержень единичной длины, заделанный на одном конце и нагруженный продольной силой при температуре материала (рис. П1).

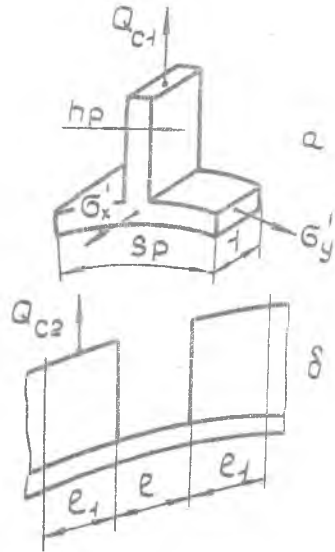
4. Расчетные сечения по длине корпуса камеры – поперечные сечения с максимальным радиусом стенки на ее участках с одним числом ребер.

5. Математическая модель расчета. Сила, действующая вдоль ребра,

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2}.$$

Здесь Q_{c1} – сила, возникающая от действия перепада давлений на стенку между ребрами;

Q_{c2} – сила, возникающая от действия перепада давлений на кольцевой участок стенки между концами ребер соседних участков, Н/м.



Р и с. П1. Геометрические размеры и усилия, действующие на соединенные ребра стенки с рубашкой корпуса камеры

$$Q_{c1} = \left(\frac{\sigma'_x h'}{2m} + \frac{\sigma'_y h'}{2n} - p_r \right) S_p + \rho_x \delta p,$$

где σ'_x, σ'_y - напряжения в стенке, возникающие при общей деформации корпуса;

$$\sigma'_x = \frac{c'}{c} \frac{N_x}{h'};$$

$$\sigma'_y = \frac{c'}{c} \frac{N_y}{h'},$$

так как $\Delta \varepsilon_t = 0$.

При $\Delta p = 0$

$$N_x = N_y = \rho_x \delta,$$

где ρ_x - давление охладителя в тракте охлаждения;
 δ - высота ребра;

$$\Delta p = p_r - p_n;$$

p_r - давление газа в камере;

p_n - давление окружающей среды;

$$c' = E' h';$$

$$c = E' h' + E'' h'';$$

c' - жесткость стенки при растяжении;

c - жесткость корпуса при растяжении;

h', h'' - толщины стенки и рубашки;

E', E'' - модули упругости их материала;

S_p - шаг ребра;

δp - ширина канавки между ребрами;

$$Q_{c2} = \frac{\Delta p' S_p \rho}{2 \ell},$$

где ℓ - расстояние между концами ребер соседних участков стенки с разным числом ребер;

$l_1 = l$ - длина ребра, на которую распределяется усилие от действия перепада давления $\Delta p'$ на кольцевой участок;

$$\Delta p = p_x - p_r.$$

Напряжение в материале ребра

$$\sigma_p = \frac{Q_c}{h_p},$$

где h_p - толщина ребра.

Коэффициент запаса прочности ребра

$$n_B = \frac{\sigma_B'}{\sigma_p},$$

где σ_B' - предел прочности материала ребра при $T_x' = T_{\text{экс. макс.}}$,
 $T_{\text{экс. макс.}}$ - максимальная температура эксплуатации ЕРДВ (323 К).

Примечание. Если условные обозначения величин приведены в предыдущих расчетах, их расшифровку можно не делать.

6. Исходные данные в сечении i .

Материал ребра , $T_{\text{экс. макс.}} = \dots$ К;

$\sigma_B' = \dots$ МПа; $E' = \dots$ МПа; $h' = \dots$ м

Материал рубашки . . . ; $E'' = \dots$ МПа; $h'' = \dots$ м;

$S_p = \dots$ м; $V_p = \dots$ М; $l = \dots$ м; $p_x = \dots$ МПа;

$p_r = p_H = \dots$ МПа; $z_M = \dots$ м; $z_H = \dots$ м; $[n_B] = \dots$

7. Расчет:

$$N_x = N_y \dots \text{ МПа/м}$$

$$\sigma_x' = \dots \text{ МПа}$$

$$\sigma_y' = \dots \text{ МПа}$$

$$Q_{c1} = \dots \text{ МН/м}$$

$$Q_{c2} = \dots \text{ МН/м}$$

$$Q_c = \dots \text{ МН/м}$$

$$\text{МПа}$$

$$\sigma_p = \dots \text{ МПа}$$

$$n_B = \dots$$

8. Таблица коэффициента запаса ребра по сечениям.

l	0	15	28	34	40
n_{B_i}					

9. Заключение. Так как $n_{B_i} \geq [n_B]$, то прочность ребер обеспечена.

Сортамент конструкционных материалов [II]

Листовая холодно- и горячекатаная сталь толщиной:

0,5...0,8 мм через 0,05 мм; 0,8...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 мм - через 0,5 мм; 5...22 мм - через 1 мм.

Круглая и шестигранная сталь толщиной:

3,1...4,2 мм - через 0,1 мм; 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 1 мм.

листы бронзовые толщиной:

0,4...1,8 мм - через 0,1 мм; 1,8...2,2 мм - через 0,2 мм.

Основные параметры МРД
Основные данные МРД с ВПТ

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо (окис- литель, горючее)	α	P_n кН	$\frac{I_{уд},Н \cdot С}{кг}$
Белл 8258, США	Взлетный, лунная кабина кк "Апол- лон"	$N_2 O_4$ А-50	1,6	16	3230
МТРА - Ю500, Спейс	Посадочный, лун- ная кабина кк "Аполлон"	"-"	1,6	4,5-47,6	2980 3100
AJ - Ю-137, Эрджет, США	Маршевый, кк "Аполлон"	"-"	1,6	100	3150
AJ - Ю-138, Эрджет, США	III ступень р-н "Титан" Э С	"-"	2	36	3120
AJ - Ю-Ю4 Эрджет, США	II ступень р-н "Тор-Эйбл-Стар"	HNO_3 НДМГ	2,8	36	2780
LR -54-A-2, Рокитдайн, США	Разгонный) летающ. маршевый) мишень	HNO_3 МА-F-4	-	3,1-0,6	2310 2620
TR -201, TRW, США	II ступень ракеты "Дельта"	$N_2 O_4$ А-50	-	45	3020
Эрджет, США	Система орбитальн. маневрирования КК "Shuttle"	$N_2 O_4$ ММГ	-	27,2	3130
КДУ, СССР	Спутник связи "Молния"	$N_2 O_4$ НДМГ	-	2	-
LR - 58, RM- Тиокол, США	Снаряд "воздух- земля". Булпап	HNO_3 амины	-	54	-
"Вексен" LRBA, Франция	I ступень "Эмерод" р-н "Дьяман"	HNO_3 скипидар	3	310	2030
LRBA, Франция	II ступень "Кора- ли" р-н "Европа"	$N_2 O_4$ НДМГ	2	4x70*	3000
SEP, Франция	I ст. р-н "Дьяман"	"-"	-	420	2600

* Число камер.

P_x , МПа	F_a	t , с	J , МН·с	P_B МПа	Вид аккумулятора и рабочее вещество	Габариты (длина, диаметр), мм	Сухая мас- са двига- теля, кг
0,9 0,08	45	960	15,36	-	ГАД гелий	1250 790	92
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
1,44	40	300	10,8	2,0	Гелий	-	-
1,4 2,1	6,4 24	90 300	0,28 0,18	-	Гелий	470 230	-
0,72	-	150	6,75	-	"-	-	113
0,88	-	-	-	-	"-	-	-
-	-	65	0,13	-	Воздух	-	-
-	-	-	-	-	ПАД	-	-
1,8	-	93	28,8	2,38	"-	-	-
-	-	100	28,0	-	ЖАД	-	-
2,0	-	110	46,2	2,4	"-	-	390

Основные параметры

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	α	$P_{т,}$ кН	$\frac{J_{ул.}}{H \cdot C}$ кТ	$P_{к,}$ МПа	МРД без дожигания	
							F_a	
LR-8I-BA-13, Белл, США	Ступень "Агена" ракет-носителей	$N_2O_4 + HDMT$	2,55	72,7	3000	3,5	-	
Белл, США	III ступень р-н "Титан" 2	$F_2 + H_2$	-	180	4400	3,5	45	
F-I, Рокит- дайн, США	I ступень, р-н "Сатурн" 5	$O_2 + RP-I$	2,8	7940	2630	6,5	16	
J-2, "-"	II и III ступень р-н "Сатурн" 5	$O_2 + H_2$	5	1040	4260	5,05	27,5	
J-25, "-"	Космические ракеты	$O_2 + H_2$	5	1180	4310	-	40	
H-I "-"	I ступень р-н "Сатурн" 1В	$O_2 + RP-I$	2,23	1040	2950	4,95	8	
LR-79-NA-9	I ступень р-н "Тор-Дельта"	"-"	-	680	2600	-	8	
LR-89-NA-5	I ступень р-н "Атлас-Агена"	"-"	-	750	2600	4,5	8	
LR-105-NA-5	II ступень р-н "Атлас-Агена"	"-"	-	383	3080	5,16	25	
LR-87-AJ-9 Эрджет, США	I ступень р-н "Титан" 3С	$N_2O_4 + A-50$	1,93	1070	2880	5,4	8	
LR-9I-AJ-9, Эрджет, США	II ступень р-н "Титан" 3С	$N_2O_4 + A-50$	1,8	453	3160	5,75	49	
RZ-2, Роллс-Ройс, Англия	Ракета "Блю- Стрик"	$O_2 + \text{керосин}$	2,45	763	2890	3,8	8	
HM-7, SEP Франция	III ступень р-н "Ариан"	$O_2 + H_2$	5,35	4x18*	4250	3,57	-	
HM-60, SEP Франция	- " -	"-"	5,1- 6,0	900	4365	100	-	

* Число камер.

современных АД с НРТ

Т, с	Т, мин.с	Способ газоге- нерации	Давление за насо- сами, МПа	Зажига- ние в к.с., ЖТГ	Габариты (длина, диаметр), мм	Сухая масса двигателя, кг
<u>генераторного газа</u>						
240	32,5	АГГ	-	Само- воспл.	2100 900	136
540	97,2	-"-	-	-"-	-	-
165	1220	-"-	-	Хим. электр.	5490 3660	8400
500	520	-"-	6,5 8,0	Электр.	3378 2045	1585
-	-	Отбор газа из камеры	-	-"-	-	-
242	252	АГГ	5,6 7,0	Хим. электр.	2400 1270	920
150	104	-"-	-	Пиро- техн.	3650	900
120	90	-"-	-	Хим. пиро- техн.	2400 1500	641
270	108	-"-	-	Хим. пиро- техн.	2400 1520	446
165	172	-"-	-	Само- воспл.	1065	890
220	100	АГГ	-	Само- воспл.	965	570
160	122	-"-	5,5 5,2	Пиро- техн.	3200	683
563	40,5	-"-	5,0	-"-	1617 847	145
29I	-	-"-	12,6 15,0	-"-	4000 2520	1300.

Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	α	P_n , кН	$\frac{J_{yn},Н \cdot с}{кг}$	P_k , МПа	F_a
"Викинг" П Франция	I ступень р-н "Ариан"	$N_2O_4 + A-50$	-	700	2760	5,66	-
МВВ, ФРГ	III ступень р-н "Ариан"	$O_2 + H_2$	-	58,9	4340	2,95	-
РД-214, СССР	2 ступень р-н "Космос"	N_2O_4 + керосин	-	4* x 161,5	2640	4,5	7
РД-107, СССР	I ступень р-н "Восток"	O_2 + керосин	-	4x255	3140	6,0	19
РД-119, СССР	II ступень р-н "Космос"	$O_2 + НАМГ$	-	110	3520	8,0	100
LR-99- RM-I Тиokol, США	Эксперимент, самолет X-15	$O_2 + NH_4$	1,25	258	2760	4,2	9,8
AR2-3, Рокитдайн, США	Тренир. самол- лет F-104A	$H_2O_2 + JP-4$	6	13 27	-	3,5 4,2	12
"Стентор" Бристоль-Сид- дли (BS), Англия	Снаряд "воз- дух-земля" "Блю-Стил"	H_2O_2 + ке- росин	-	18 72	-	-	-
"Гамма" 2 (BS-625), Англия	II ступень р-н "Блэк Эрроу"	H_2O_2 + ке- росин	8,2	2x35	2650	4,8	-
Гамма МК-304, Англия	Ракета "Блэк-Найт"	"-"	"-"	4x28	2170	4,9	-
"Гамма" 8 (BS-606), "-"	I ступень р-н "Блэк Эрроу"	"-"	"-"	8x?	2170	-	-
BS-605, "-"	Самолет "Бакенир"	"-"	"-"	2x18	-	-	-
HM-7 Франция, SEP	III ступень р-н "Ариан-3"	$O_2 + H_2$	4,5	70	4342	3,1	-

* Число камер.

τ , с	T , МН.с	Способ газогенерации	Давление за насо- сами, МПа	Зажига- ние в к.с., ЖГГ	Габариты (длина, диаметр), мм	Сухая масса двигате- ля, кг
139	97,3	-	-	Само- воспл.	-	390
-	-	-	-	-	-	72
-	-	ЖГГ H_2O_2	-	Хим., разлож.	-	-
-	-	H_2O_2	-	Пиро- техн. разлож.	-	-
-	-	ЖДМГ	-	-	-	-
120	31	H_2O_2	70 80	Электр., разлож.	1800 900	415
-	-	-	-	Терм.	-	-
-	-	-	-	-	1478 1143	-
-	-	H_2O_2	96 84	Терм.	-	182
-	-	-	97 83	-	-	358
-	-	-	96 82	-	-	-
-	-	-	-	-	1067 305	106
565	-	ЖГГ	-	Электр.	-	152

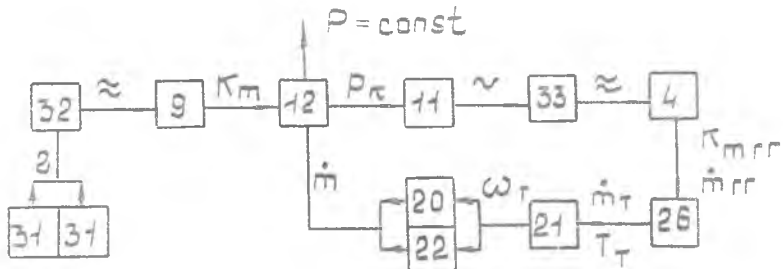
Марка двигателя, фирма, страна	Назначение	Топливо	\mathcal{Z}	P_n , кН	$\frac{J_{уп.}}{H \cdot c}$ кг	P_x , МПа	F_a
HM-60 Франция,	I ступень р-н "Ариан-5"	$O_2 + H_2$	6,0	1025	4235	9,8	-
LE-5 Япония, "Мицубиси"	II ступень р-н H - II	$O_2 + H_2$	5	103	4340	3,63	-
LE-7 -"	I ступень р-н H II	-"	6	932	4405	14,7	-
<u>ЖРД с дожиганием</u>							
"Эроспайк", Рокитдайн, США	Космические ракеты	$O_2 + H_2$	5,5	III	4700	6,9	200
Линейный, Эрджет, США	-"	-"	5,5	II35	-	8,5	119
RL-10-A-3, Пратт-Уитни, США	III ступень р-н "Атлас-Центавр"	$O_2 + H_2$	5	68	4440	2,81	40
RL-129, Пратт-Уитни, США	Орбитальная ступень КАМП	-"	5,5	1300	4600	21,0	195
SSME, Рокит- дайн, США	- " -	- " -	6	2100	4520	21,0	120
ASE -"	Межорбиталь- ный транс- портный ап- парат	-"	-	91	4730	15,5	-
Двухтопливный, Эрджет	Одноступенча- тый КАМП	$O_2 + RJ-5$ $O_2 + H_2$	2,4 7,0	3330 2670	3450 4625	28,0 21,0	40 200
РД-253; СССР	I ступень р-н "Протон"	$N_2 O_4 + HDMT$	-	1335	3110	14,7	-
РД-170, СССР	I ступень р-н "Энергия"	$O_2 + \text{керосин}$	-	4x x2015	3296	25,0	-
РД-122, СССР	II ступень р-н "Энергия"	$O_2 + H_2$	-	2000	-	-	-

Т, с	Т, мин	Способ газоре- нерации	Давление за насо- сами, МПа	Зажига- ние в к.с., ΔГГ	Габариты (длина, диаметр), мм	Сухая масса двигателя, кг
29I	-	ΔГГ	12,6 15,0	"	4000 2520	1300
370	-	ΔГГ	-	"	-	255
3I5	-	ΔГГ	-	"	-	1650
<u>генераторного газа</u>						
-	-	Испаре- ние H ₂ в охл. тракте к.с.	21,6 11,7	Электр.	610 1680	180,7
-	-	ΔГГ	-	"	3000 1800x2400	-
440	30	Испаре- ние H ₂ в охл. тракте к.с.	70	Электр.	1010	133
300	390	ΔГГ	42,0	Хим.	-	900
300	630	"	42,0	Электр.	4240 2670	2870
-	-	"	-	"	-	174
-	-	"	-	"	-	-
-	-	"	-	"	-	-
-	-	ΔГГ	-	Само- воспл.	-	1280
-	-	"	-	Пиро- техн.	-	11500
-	-	"	-	Электр.	-	-

Пример оформления функциональной схемы системы

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

В качестве примера на рис. III показана функциональная схема системы одновременного опорожнения баков (СОБ) ДУ, изображенной на рис. I.



Р и с. III. Функциональная схема системы СОБ

Схема читается следующим образом. Сигналы (\sim) уровней 31 в баках поступают в блок 32 бортовой ЭВМ (БЭВМ). После сравнения текущих величин уровней с программными и выхода разницы за пределы допуска блок 32 посылает команду (\approx) регулятору 9 системы СОБ, который изменяет расход одного из компонентов топлива. В результате изменения K_m в камере 12 уменьшается тяга P . Датчик давления газа 11 подает сигнал (\sim) в блок 33 БЭВМ, который при выходе величины P_k за пределы допуска подает команду регулятору тяги 4. В результате этого изменяется расход и соотношение компонентов топлива в ДРГ 26, что вызовет изменение расхода и температуры газа через турбину 21, угловой скорости ее вращения ω_T , расхода топлива \dot{m} в камеру и восстановление расчетной величины тяги.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

1. Цель и задачи курсового проектирования	3
2. Содержание и объем проекта	4
3. Порядок выполнения курсового проекта	5
3.1. Функциональное проектирование двигатель- ной установки	5
3.1.1. Проектирование пневмогидро- электрической системы ДУ	6
3.1.2. Компоновка двигателя	13
3.2. Проектирование камеры двигателя	14
3.2.1. Проектирование системы теплозащиты элементов камеры двигателя	14
3.2.2. Конструирование камеры двигателя с учетом современной технологии ее изготовления	29
3.2.3. Расчет статической прочности элементов камеры	48
3.2.4. Определение вибрационных характе- ристик корпуса камеры	51
3.3. Специальное задание	66
4. Оформление проекта	66
4.1. Графическая часть	66
4.2. Пояснительная записка	68
5. Защита проекта	69
Библиографический список	71
Приложения	73

Б о р и с о в Валерий Александрович
П и ч у г и н Дмитрий Федорович

КОНСТРУКЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Т.К.К р е т и н и н а
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а
Корректор Н.Д.Ч а й н и к о в а

Подписано в печать 26.03.93. Формат 60x84^I/16.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 5,58. Усл.кр.-отт. 5,70.
Уч.-изд.л. 5,48. Печать оперативная.
Тираж 250 экз. Заказ *н 56*. Арт. С - 6/93.

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П.Королева. 443086 Самара,
Московское шоссе, 34.

Участок оперативной полиграфии ИПО Самарского
государственного аэрокосмического университета.
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.