

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Методические указания к циклу лабораторных работ

Данные методические указания составлены к циклу лабораторных работ по изучению и анализу конструкций камер двигателей летательных аппаратов (ДЛА)

В них последовательно приведены задания к лабораторным работам, сведения о конструкции элементов камеры, недостаточно обобщенные в учебной литературе, контрольные вопросы для проверки усвоения и необходимые пособия.

Указания предназначены для студентов, изучающих курс «Конструкция и проектирование ДЛА».

Составитель Д. Ф. Пичугин

Изучение учебного материала по циклу «Камеры ДЛА» рассчитано на аудиторное и неаудиторное время. Поэтому к каждой лабораторной работе составлены домашнее и аудиторное задания.

Во время аудиторных занятий производится анализ элементов конструкции в следующем порядке:

- назначение, конструкция и принцип работы элемента;
- связь с другими элементами;
- условия работы и требования к элементу;
- схема классификации элемента;
- преимущества и недостатки данного типа элемента, степень соответствия его предъявляемым требованиям;
- область применения;
- порядок проектирования;
- материал деталей;
- технология изготовления деталей; сборки и испытаний элемента;
- технические условия на его сборку и испытания;
- дефекты, возникающие при эксплуатации элемента, и меры их предупреждения;
- оценка массы, надежности работы и технологичности изготовления элемента.

Кроме того, на аудиторных занятиях производится также предельный выбор конструктивной схемы камеры и ее элементов и двигателя, проектируемого студентом в ходе выполнения курсовых работ по кафедрам «Теория ДЛА», «Термодинамика и теория теплообмена» и курсового проекта по кафедре «Конструкция и проектирование ДЛА». Поэтому перед началом данного цикла лабораторных работ студент должен по данным, полученным в расовой работе по кафедре ТДЛА, составить график изменения параметров газа (p_2 , T_2 , ω_2) по длине камеры проектируемого двигателя, газодинамический контур которой в соответствующем масштабе вычертить под осью абсцисс.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КАМЕР ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы: знакомство с конструкциями камер, с методикой выбора параметров системы проточного охлаждения камеры, изучение конструкции коллекторов и креплений камеры.

Домашнее задание:

1. Проработать материал данного указания.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Аудиторное задание:

1. Изучить конструкцию камер заданных двигателей, отметив особенности конструкции систем теплозащиты и креплений, зарисовать их конструктивные схемы.

2. Выбрать вид теплозащиты элементов проектируемой камеры, вид охладителя, схему его течения в тракте охлаждения, типы коллекторов и место их расположения.

3. Выбрать место расположения опор проектируемой камеры и их тип.

4. Выбрать, обосновать выбор и зарисовать конструктивную схему камеры проектируемого двигателя с членением ее на сборочные единицы.

5. Сделать эскизы коллекторов и опор проектируемой камеры.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАМЕРАХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В камере ДЛА происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию газов, а затем — в кинетическую энергию вытекающей струи. Особенностью этих камер по сравнению с камерами других двигателей на химическом топливе (поршневых, воздушнореактивных) является высокая тепловая и силовая напряженность. В камере ДЛА в течение весьма короткого

времени (0,02—0,004 сек.) при больших давлениях и температуре сгорает в малом объеме значительное количество топлива, причем параметры продуктов сгорания изменяются как по длине (рис. 1, а), так и по радиусу поперечного сечения камеры (рис. 1, б).

Основными задачами при создании камеры ДЛА являются получение максимального удельного импульса тяги в заданных условиях, обеспечение высокой надежности работы при минимальной массе и хорошей технологичности изготовления.

По конструктивным особенностям камера делится на смешительную головку А и на корпус камеры В (рис. 2).

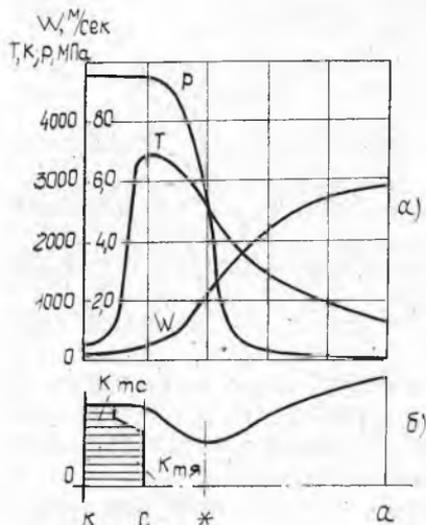


Рис. 1. График изменения параметров продуктов сгорания топлива по длине камеры (а) и ее сечению (б). $K_{мя}$ и $K_{мс}$ — массовое соотношение компонентов топлива в ядре и в пристеночном слое соответственно

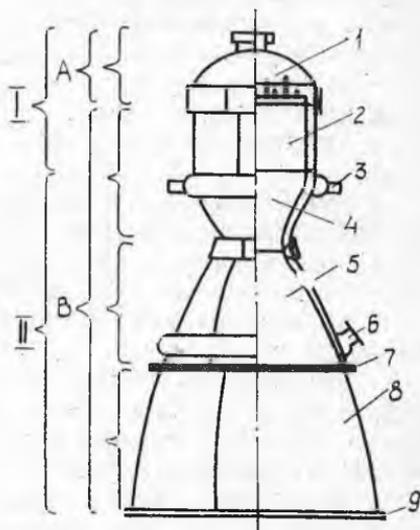


Рис. 2. Конструктивная схема камеры ЖРД: 1 — смешительная головка; 2 — цилиндрический участок корпуса камеры; 3 — опора камеры; 4 — сужающаяся часть сопла; 5 — расширяющаяся часть сопла; 6 — входной коллектор тракта охлаждения; 7 — фланец; 8 — сопловой насадок; 9 — кольцо жесткости

По назначению элементов в организации рабочего процесса камера разделяется на камеру сгорания I и сопло II. В камере сгорания происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую. Она состоит из смешительной головки 1 и части корпуса 2. В сопле происходит преобразование потенциальной энергии давления газа в кинетическую энергию его истечения. Оно состоит из сужающейся 4 и расширяющейся 5, 8 частей корпуса.

Наконец, с точки зрения технологии изготовления, камера делится на несколько основных сборочных единиц (например, на головку 1, среднюю часть 2 и 4, на сопловую часть 5 и насадок 8).

При проектировании камеры рекомендуется следующий порядок решения вопросов:

— на основе заданных или выбранных исходных данных (тяга, вид топлива, соотношения компонентов, p_k , p_a) производится расчет процессов сгорания топлива и течения продуктов сгорания по соплу. В результате расчета определяется температура и состав газов в трех характерных сечениях камеры (на входе в сопло, в критическом сечении и на срезе сопла), а также площади критического и выходного сечений сопла, удельный импульс тяги камеры и расход компонентов через нее;

— выбирается форма камеры сгорания и определяются ее размеры (диаметр и длина);

— выбирается форма сопла и производится его профилирование;

— выбирается тип головки и производится расчет процесса смесеобразования в камере;

— производится геометрическая компоновка камеры, в результате чего получается ее газовый тракт;

— выбирается вид тепловой защиты элементов камеры и производится его расчет;

— выбираются схемы силовых систем головки и корпуса, производится разработка конструкции последних с членением их на сборочные единицы, выбирается материал для изготовления деталей и производится расчет их прочности;

— проектируются крепления камеры к летательному аппарату;

— производится конструктивная компоновка камеры, вычерчиваются ее сборочный чертеж, сборочные чертежи единиц и чертежи деталей;

— уточняется технология изготовления деталей и сборки камеры, назначаются технические условия на сборку и испытания; — определяются габариты и масса камеры.

Рекомендации по методикам решения вопросов, указанных в пунктах 1—6, приводятся в ряде работ по курсу «Теория ДЛА».

Классификация камер производится по основным признакам ее элементов, а именно: по их форме, схеме силовой системы, способу теплозащиты, технологии изготовления.

Силовой системой называется совокупность элементов конструкции, которые воспринимают действующие нагрузки, частично замыкают их внутри конструкции, а частично передают в виде равнодействующей силы (силы тяги) на летательный аппарат. Конструктивные элементы, входящие в силовую систему, называются силовыми.

К силовой системе предъявляются следующие требования:

— силовые детали и их соединения должны иметь форму, при которой на них воздействуют минимальные нагрузки (например, детали, находящиеся в потоке жидкости или газа, должны иметь обтекаемую форму и гладкую поверхность);

— силы, действующие на детали, должны замыкаться на возможно более коротком участке при помощи элементов, которые нагружены растяжением (сжатием), а не изгибом;

— при действии нагрузок размеры силовых деталей должны меняться в допустимых пределах, детали не должны терять устойчивости формы или входить в опасные резонансные колебания;

— конструкция и соединения деталей, работающих при разных температурах, должны обеспечить свободу температурных деформаций или минимальные температурные напряжения;

— прочность и жесткость силовых деталей должна обеспечиваться при их минимальной массе.

Совершенство конструкции, оцениваемое с точки зрения работоспособности, минимальных габаритов и массы, во многом определяется рациональностью силовой системы. В камере ЖРД почти все детали являются силовыми, что позволяет получить весьма малую ее удельную массу (0,001—0,0005 кг/н):

1. Системы теплозащиты элементов камеры

Элементы камеры, непосредственно соприкасающиеся с горячими газами (внутреннее днище и форсунки головки, стенка камеры сгорания и сопла), нуждаются в эффективной тепловой защите, так как при температуре выше допустимой снижаются механические свойства материала деталей и возникают недопустимо большие их деформации. Кроме того, высокая скорость движения газов способствует эрозии (размыванию) и коррозии (окислению) поверхностей в местах, где вблизи стенки из-за неравномерного смещения компонентов топлива возникает окислительная среда.

Тепловая защита осуществляется охлаждением элементов конструкции, их теплоизоляцией или же одновременным использованием этих принципов (рис. 3).

В настоящее время наиболее распространена теплозащита элементов камеры с помощью проточного охлаждения. В этом случае стенка, соприкасающаяся с горячим газом, с противоположной стороны омывается охладителем (жидкостью или газом). Очевидно, что при этом конструкция корпуса камеры должна быть двухстенной. Если отводимое тепло передается компонентам топлива, то такое охлаждение называется регенеративным. Экспериментальные камеры могут иметь автономное охлаждение, при ко-

тором стенка корпуса охлаждается водой и отводимое тепло не участвует в рабочем процессе двигателя.

Возможно также охлаждение стенки без применения охладителя. При емкостном охлаждении воспринимаемое стенкой тепло отводится от ее горячей поверхности в глубокие слои материала. При радиационном охлаждении стенка изготавливается из тугоплавких материалов, и при ее нагреве определенное количество тепла излучается в окружающее пространство.

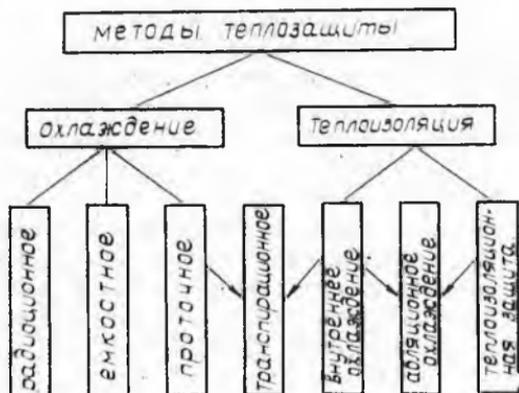


Рис. 3. Схема классификации систем теплозащиты элементов камер

Принцип теплоизоляции, позволяющий значительно снизить величину тепловых потоков в стенку, наиболее просто осуществляется с помощью теплоизоляционных покрытий, имеющих низкую теплопроводность и предварительно наносимых на внутреннюю поверхность стенки камеры (теплоизоляционная защита). Другие способы теплоизоляции основаны на образовании около этой поверхности постоянно возобновляемого защитного слоя низкотемпературного газа (внутреннее охлаждение). Этот слой можно образовать несколькими способами:

расположением на периферии форсуночного блока головки форсунок, обеспечивающих необходимое соотношение компонентов топлива в пристеночном слое газа;

установкой на периферии форсуночного блока головки или в стенке корпуса камеры поясов с отверстиями, через которые подается жидкость или газ (завесное охлаждение);

изготовлением внутреннего днища головки или стенки корпуса камеры из пористого материала, через который также подается жидкость или газ;

нанесением на внутреннюю поверхность стенки корпуса аблирующего покрытия, которое имеет низкую теплопроводность и, постепенно выгорая, создает защитный слой газа у стенки (абляционное охлаждение).

По мере увеличения давления газа в камере и применения высококалорийных топлив возрастал и тепловой поток в ее стенки, что потребовало разработки более эффективных систем теплозащиты. Поэтому в настоящее время в большинстве камер применяется комбинирование различных способов теплозащиты.

Камеры ЖРДМТ, работающие на однокомпонентных топливах, специальной теплозащиты не имеют, так как при разложении этих топлив температура газа не превышает допустимой температуры материала стенки.

Вид тепловой защиты стенки и схема силовой системы корпуса тесно взаимосвязаны и определяют в основном выбор материала деталей и технологию изготовления корпуса камеры. Если камера проектируемого двигателя по условиям своей работы не очень отличается от существующих, выбор способа теплозащиты ее элементов значительно облегчается, так как обычно стараются использовать способы, хорошо себя зарекомендовавшие на выбранном прототипе. Значительно сложнее сделать выбор способа теплозащиты, если параметры проектируемого двигателя значительно отличаются от параметров существующих двигателей. В этом случае сначала необходимо установить возможность применения того или иного способа теплозащиты в данных условиях.

Примерные величины максимальных плотностей тепловых потоков $q_{\text{макс}}$, при которых можно использовать тот или иной способ (получая приемлемые значения параметров системы теплозащиты), и соответствующие им величины p_k приведены в табл. 1.

Если можно воспользоваться несколькими способами теплозащиты, то производятся расчеты всех этих способов и выбирается тот, при котором приведенный удельный импульс тяги $J_{y \text{пр}}$ будет максимальным, а затраты средств на доводку системы теплозащиты до заданной степени надежности и на изготовление камеры — наименьшими.

Если ни одним из способов невозможно обеспечить теплозащиту элемента, то применяется их комбинирование, которое позволяет повысить как надежность теплозащиты, так и $J_{y \text{пр}}$. Так, сочетание проточного и внутреннего охлаждения позволяет уменьшить массу двигателя в результате снижения гидравлических потерь в тракте охлаждения, а также уменьшить потери удельного импульса тяги вследствие сокращения расхода вещества на образование пристеночного слоя. Если при этом на наиболее теплонапряженные участки стенки нанести теплоизолирующее покрытие,

Таблица 1

| | | | | |
|--|-------|------|-----|-----|
| $q_{\text{макс}} \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ | 0,12 | 1,2 | 12 | 120 |
| $p_k, \text{МПа}$ | 0,035 | 0,35 | 3,5 | 35 |
| Излучение | _____ | | | |
| Охлаждение емкостное (кратковременно) | _____ | | | |
| Охлаждение емкостное (кратковременно) с приме- нением теплоизолирующих покрытий | _____ | | | |
| Абляция | _____ | | | |
| Охлаждение проточное | _____ | | | |
| завесное | _____ | | | |
| транспирационное | _____ | | | |

то эффективность тройной комбинации будет еще выше. Наиболее часто встречающиеся комбинации способов теплозащиты представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Основной способ теплозащиты | Вспомогательный способ теплозащиты | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | Теплоизо- лирующее покрытие | Абляцион- ное охлаж- дение | Завесное охлаж- дение | Транспир. охлаж- дение |
| Наружное охлаждение | × | — | × | × |
| Емкостное охлаждение | × | × | × | — |
| Охлаждение излучением | × | — | × | — |
| Абляционное охлаждение | × | — | × | — |
| Завесное охлаждение | × | × | — | — |

Особенно трудно обеспечить теплозащиту стенки корпуса и дна головки камер ЖРД с дожиганием, имеющих высокие p_k .

Известно, что $q \sim p_k^{0,8}$, поэтому плотность теплового потока в камерах ЖРД с дожиганием будет весьма велика (рис. 4). В камерах, охлаждаемых углеводородным горючим, температура подогрева которого ограничена условиями недопустимости кипения

или разложения, приходится применять комбинацию проточного охлаждения с несколькими поясами завесы и теплоизолирующим покрытием. Охлаждающие свойства водорода в жидком и газообразном состоянии практически одинаковы. Поэтому в камерах, работающих на топливе $O_2 + H_2$, применяется комбинация проточного охлаждения, которое интенсифицируется путем создания определенной шероховатости поверхностей каналов охлаждающего тракта, с теплоизолирующим покрытием. Ведутся также опыты по использованию в качестве охладителя кислорода (в жидком, а после испарения — в сверхкритическом состоянии), расход которого значительно больше, чем расход горючего.

В последнее десятилетие для теплозащиты элементов камеры начинает использоваться транспирационное охлаждение, при котором охладитель вводится в огневую полость камеры через пористую стенку. Так как охладитель равномерно покрывает поверхность стенки, расход его по сравнению с расходом на завесное охлаждение уменьшается в несколько раз. Применение пористого охлаждения стало возможным после того, как в двигателях стали использоваться в качестве горючих водород, аммиак и метан, обладающие хорошими охлаждающими свойствами в газообразном состоянии и разлагающиеся без твердых остатков (аммиак NH_3) или при высокой температуре (метан CH_4 — при $T_p \approx 1000$ К). Кроме того, для изготовления пористых стенок необходимо было разработать пористые материалы или пористые конструкции, отвечающие заданным требованиям. Пористые материалы для этой цели получают или спеканием порошков металлов (например, пористые вихром, вольфрам и др.), или прессованием и спеканием сеток с очень мелкими ячейками (материал Rigimesh, используемый для пористых днищ головок. — см. рис. 14, [1]). Пористая конструкция представляет собой набор графитовых или медных колец, имеющих на торцах большое число тангенциальных канавок, жидкость или газ в котором подается из продольных отверстий в коль-

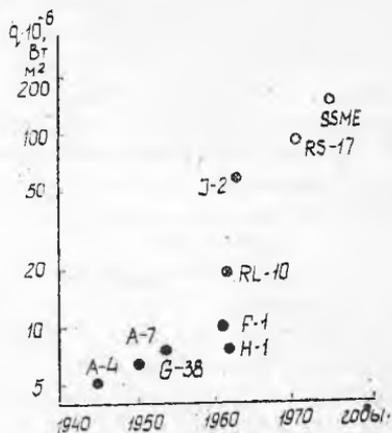


Рис. 4. Изменение максимальной плотности теплового потока от газа в стенку камеры по годам: ● — камеры двигателей без дожигаания, работающих на кислороде и керосине и на $O_2 + H_2$; ○ — камеры двигателей с дожигаанием, работающих на $O_2 + H_2$

цах. Изменяя число и размеры этих канавок, число и толщину колец, можно получить необходимую проницаемость. Кольца опираются на рубашку корпуса непосредственно или же через теплоизолирующее покрытие.

В камерах ЖРД первых ступеней и ракет-носителей для теплозащиты стенок до $\bar{F} = 16-20$ применяется проточное охлаждение в комбинации с внутренним; для камер ЖРД верхних ступеней ракет и космических аппаратов наряду с проточным охлаждением начинают использовать теплозащиту абляцией и завесное охлаждение; наконец, для сопловых насадков и для камер ЖРД МТ — излучение в комбинации с завесным охлаждением. Емкостное охлаждение в сочетании с теплоизолирующими покрытиями применяется, в основном, в камерах РДТТ.

Регенеративное охлаждение является наиболее эффективным для теплозащиты элементов камеры при $p_k > 1,0$ МПа. Перед расчетом системы регенеративного охлаждения необходимо выбрать вид охладителя и схему течения его по тракту охлаждения.

В качестве охладителя выбирается тот компонент топлива, который обладает слабым коррозионным воздействием на конструкционные материалы, большей тепловосприимчивостью и лучшей охлаждающей способностью.

Тепловосприимчивостью компонента называется количество тепла Q_0 , необходимого для нагрева его массового расхода \dot{m}_0 от температуры на входе в тракт охлаждения $T_{0\text{вх}}$ до температуры его на выходе $T_{0\text{вых}}$:

$$Q_0 = \dot{m}_0 \bar{C}_0 (T_{0\text{вых}} - T_{0\text{вх}}),$$

где \bar{C}_0 — средняя величина теплоемкости в интервале температур от $T_{0\text{вх}}$ до $T_{0\text{вых}}$.

Величина $T_{0\text{вых}}$ жидкого охладителя ограничивается температурой его кипения или разложения при давлении на входе в форсунки, а газообразного охладителя — условием обеспечения прочности конструкции. Величина $T_{0\text{вх}}$ для ДУ, заранее заправленных, принимается равной верхнему пределу эксплуатационной температуры, а для ДУ, заправляемых перед стартом, — температуре компонента при заправке.

Охлаждающая способность компонента характеризуется величиной плотности теплового потока q_0 , который может быть передан стенкой охладителю,

$$q_0 = \alpha_0 (T_{c\text{x}} - T_0),$$

где α_0 — коэффициент конвективной теплоотдачи в охладитель

$$\alpha_0 = A \omega_0^{0,8} \eta_p,$$

A — величина, определяемая свойствами охладителя;

ω_0 — скорость течения охладителя;

η_p — коэффициент эффективности оребрения, равный отношению количества тепла, передаваемого охладителю оребренной стенкой, к количеству тепла, передаваемого ему гладкой стенкой [3].

В применяемых топливах охлаждающая способность обоих компонентов примерно одинакова, но тепловосприимчивость окислителей выше из-за большого их массового расхода. Поэтому для охлаждения камер с тягой более 20 кН обычно применяют горючее, обладающее слабой коррозионной активностью, а при меньших тягах — окислитель или же оба компонента.

Выбор схемы течения охладителя в тракте корпуса камеры определяется величиной силы тяги и степенью расширения сопла (рис. 5).

Для корпусов камер с небольшой степенью расширения сопла ($P = 4—6$) обычно применяется противоточная схема, когда охладитель сначала поступает во входной коллектор на срезе сопла и течет затем по тракту охлаждения в головку камеры

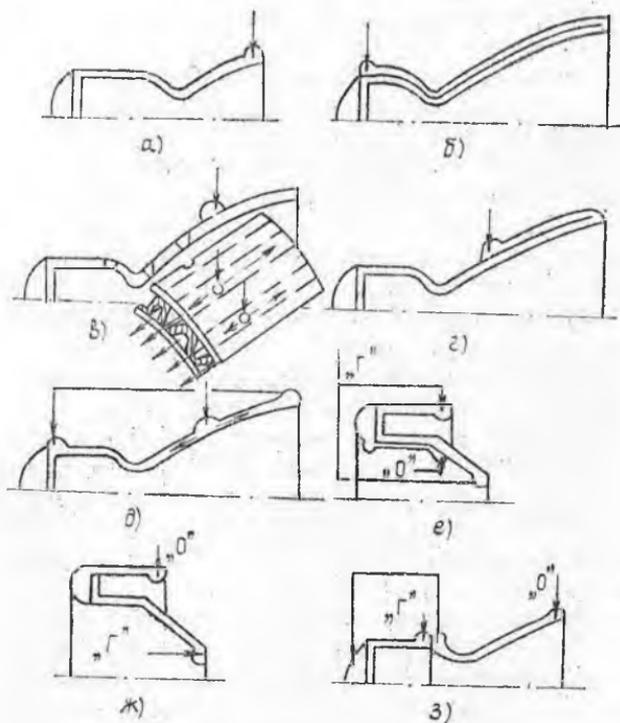


Рис. 5. Схемы течения охладителя в трактах охлаждения камер

(рис. 5, а). В камерах с трубчатой конструкцией корпуса используется схема с двойным ходом охладителя, когда входной коллектор располагается у головки (рис. 5, б). Охладитель по одним трубкам течет к срезу сопла, поворачивается в поворотном коллекторе и по соседним трубкам направляется в головку¹. Разница температуры охладителя в соседних трубках должна приводить и к разнице в температурах их стенок. Однако последняя в значительной степени выравнивается путем передачи тепла теплопроводностью в металле и практического значения не имеет. Вследствие уменьшения диаметрального размера входного коллектора и длины труб, подводящих к нему охладитель, снижается масса корпуса, упрощается компоновка двигателя, но увеличиваются гидравлические потери давления в тракте охлаждения.

Для сопел, имеющих большее расширение ($F = 8-12$), наряду с рассмотренными схемами используется схема с разделением охладителя (рис. 5, в). Входной коллектор в этом случае сдвигается от среза сопла в сторону критического сечения и размещается над последней секцией гофрированной проставки. Охладитель, поступающий из отверстий коллектора в каналы, образованные рубашкой и проставкой, разделяется на два потока. Один из них течет в сторону критического сечения, а другой — к срезу сопла. После поворота этот поток по каналам между проставкой и стенкой направляется во внутренний коллектор, образованный между концами проставок, где и смешивается с первым потоком. Расход охладителя в потоках обратно пропорционален гидравлическим сопротивлениям соответствующих каналов. Поэтому, перемещая коллектор относительно середины проставки вправо или влево, можно добиться оптимального распределения охладителя, когда его температура на входе во внутренний коллектор будет одинаковой для обоих потоков. Преимуществом такой схемы, как и схемы с двойным ходом охладителя, является снижение массы корпуса и его поперечного размера, так как входной коллектор вписывается в габарит, определяемый срезом сопла.

В камерах с трубчатым корпусом и большой степенью расширения сопла ($F = 30-40$) используется схема с полуторным ходом охладителя (рис. 5, г). В этом случае охладитель из входного коллектора поступает сначала в короткие трубки, расположенные между длинными, а затем по длинным трубкам движется в головку.

В паяно-сварных камерах, имеющих сопла большого расширения, используется схема с разделением потоков и перебросом части охладителя от среза сопла в смесительный коллектор внешним трубопроводом (рис. 5, д). При этом входной коллектор располагает-

¹ На рисунке соседние трубки корпуса условно показаны рядом, а одна над другой.

ся на расширяющейся части сопла вблизи критического сечения и большая часть охладителя течет в сторону головки, а меньшая — к срезу сопла. Это позволяет при прочих равных условиях снизить скорость течения охладителя и, следовательно, величину гидравлических потерь в тракте, а также охлаждать стенку в зоне критического сечения сопла менее нагретым охладителем. Распределение расхода охладителя по потокам производится путем подбора дроссельной шайбы в трубопроводе внешнего переброса охладителя.

Возможно использование и более сложных схем циркуляции охладителя. В камерах с штыревым соплом образуется два тракта охлаждения — тракт штыревого сопла и тракт обечайки камеры. Ввиду того, что поверхность, нуждающаяся в охлаждении, в таких камерах значительно больше, чем в камерах с круглым соплом, может быть применена схема охлаждения обоими компонентами при трехстенной конструкции корпуса (рис. 5, е) и с циркуляцией горячего и окислителя в раздельных трактах (рис. 5, ж). Схема с охлаждением двумя компонентами, циркулирующими каждый в своем тракте (рис. 5, з), применяется и для камер небольших тип, когда расхода одного компонента недостаточно для обеспечения общего теплосъема.

Предложена также схема проточного охлаждения выдвижных сопловых насадков водородом с выбросом его из микросопел на срезе насадка (см. рис. 10, [2]). Это стало возможным вследствие того, что H_2 имеет величину газовой постоянной R , на порядок превышающую R продуктов сгорания топлива. Поэтому работоспособность RT водорода при значительно меньшем подогреве будет больше RT продуктов сгорания. При расширении водорода в микросоплах, впаянных в концы трубок на срезе основного сопла, его удельный импульс может быть сравним с удельным импульсом камеры даже в том случае, если степень расширения микросопла меньше степени расширения основного сопла.

2. Коллекторы камеры

Коллекторы представляют собой кольцевые трубопроводы, охватывающие корпус камеры (рис. 6), и обычно состоят из распределителя 1, обечайки 2 и патрубков с фланцами 3. Иногда роль распределителя выполняет рубашка корпуса. Основным требованием, предъявляемым к любому коллектору, является обеспечение равномерного поля давления жидкости или газа по длине его окружности при наименьших гидравлических потерях. По общей форме коллекторы могут быть концентричными (рис. 6, в) и эксцентричными (рис. 6, г) корпусу, а по форме поперечного сечения — круглыми (рис. 6, а) и полукруглыми (рис. 6, б). Они пред-

назначены для ввода охладителя в тракт охлаждения, ввода в огневую полость камеры жидкости или газа или отбора из нее газа.

Коллекторы тракта охлаждения могут быть входными, поворотными, смесительными и выходными. Входной коллектор предназначен для ввода охладителя в тракт охлаждения корпуса. Поворотный коллектор располагается на срезе сопла и служит для изменения направления движения потока охладителя. Смесительный коллектор устанавливается в том месте тракта, где происходит слияние разделенных потоков охладителя. Выходной коллектор используется в том случае, когда охладитель из тракта охлаждения не сразу поступает в полость головки: при установке отсечного клапана непосредственно на входе в полость головки для снижения импульса последствия тяги, при охлаждении стенки обоими компонентами или при отборе газа из охлаждающего

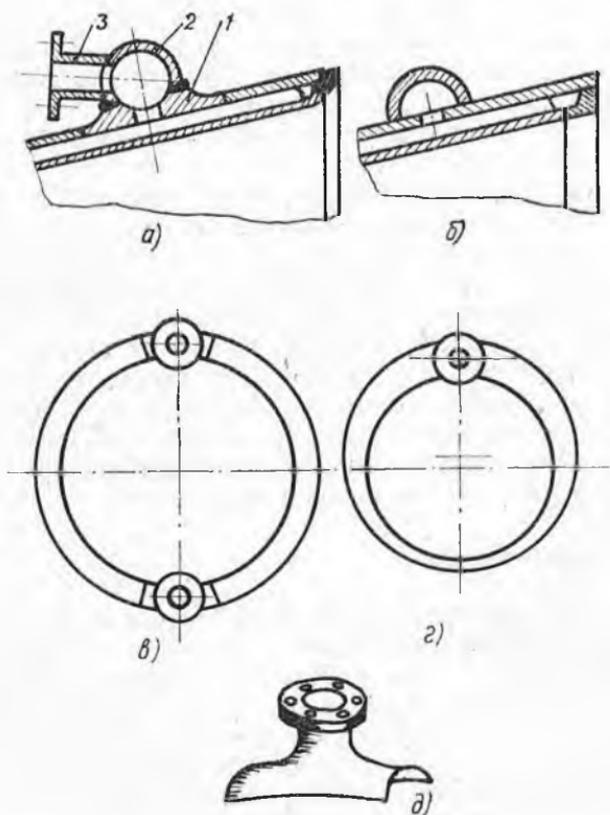


Рис. 6. Схемы коллекторов тракта охлаждения камер

тракта на привод турбины ТНА. Места расположения коллекторов зависят от выбранной схемы циркуляции охладителя в тракте.

Для получения равномерной эпюры давления жидкости или газа по окружности коллектора скорость движения охладителя в нем принимается небольшой (10—20 м/с для таких компонентов, как НДМГ, керосин, H_2O_2 , O_2 , и на порядок выше—для жидкого водорода и газообразных компонентов топлива). Подвод охладителя в коллектор осуществляется по нескольким (двум—четырем) патрубкам или, исходя из соображений удобства компоновки двигателя и снижения веса трубопроводов, — по одному патрубку. В последнем случае желательно использовать эксцентричный коллектор, площадь проходного сечения которого уменьшается по мере удаления от входного патрубка пропорционально снижению расхода охладителя.

Поскольку на выходе из патрубка поток делится пополам, то для снижения потерь на местные гидравлические сопротивления желательно, чтобы площадь поперечного сечения коллектора в месте установки патрубка была вдвое меньше площади проходного сечения последнего. Этим же соображением следует руководствоваться и при выборе суммарной площади отверстий в распределителе: если коллектор расположен на срезе сопла, она должна равняться площади проходного сечения охлаждающего тракта в этом месте, а при разделении потока охладителя на входе в тракт — удвоенной площади проходного сечения последнего.

Распределитель коллектора обычно выполняется в виде точечного сверльца с выступами, к которым приваривается обечайка. В нем сверлятся большое число отверстий малого диаметра, расположенных в шахматном порядке. Обечайка коллектора изготавливается из трубы или гибкого листового материала, сваривается с патрубками и затем приваривается к распределителю. Патрубки изготавливаются из труб или штамповкой двух половинок и сваркой их продольным швом с последующей приваркой фланцев (рис. 6, д). Готовый коллектор подвергается гидро- и пневмоопрессовке и затем сваривается с секциями рубашки, а при трубчатой конструкции припаивается к трубкам. При сборке камеры необходимо обеспечить точное расположение фланцев патрубков, так как иначе трудно будет монтировать трубопроводы.

Коллекторы для ввода жидкости или газа в огневую полость камеры с целью образования у стенки слоя низкотемпературного газа имеют различную конструкцию распределителя. Наиболее простой из них представляет собой треугольные отверстия, образованные при сборке трубчатого корпуса (см. рис. 5, [2]), через которые внутрь расширяющейся части сопла камеры вводится газ после турбины ТНА. В другой конструкции распределитель представляет собой кольцо с двумя видами отверстий — продольными

и радиальными или тангенциальными. Продольные отверстия обеспечивают возможность течения охладителя по тракту охлаждения. Для уменьшения местных потерь давления их суммарное проходное сечение должно быть возможно большим. Радиальные или тангенциальные отверстия соединяют полость коллектора с кольцевой канавкой на внутренней поверхности распределителя. При тангенциальных отверстиях жидкость предварительно закручивается и, поступая в канавку, вследствие действия центробежных сил удерживается в ней (рис. 7, а). При радиальных отверстиях для этой цели канавку прикрывает специальный козырек (рис. 7, б). Жидкость, выступая из канавки, увлекается потоком газа вдоль стенки, быстро испаряется и создает у стенки слой низкотемпературного газа.

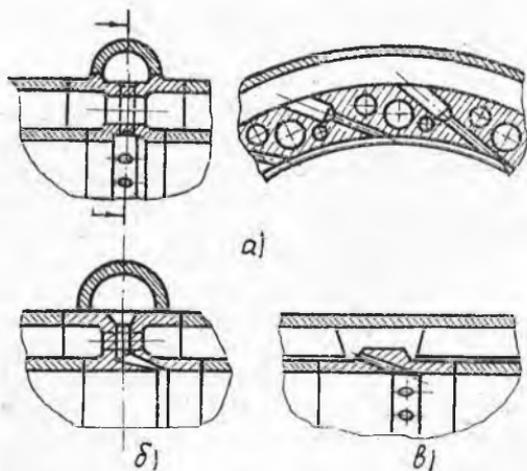


Рис. 7. Схемы коллекторов поясов завесного охлаждения

С целью предотвращения засорения или закоксования при использовании углеводородных горючих, а также упрощения технологии изготовления диаметры тангенциальных и радиальных отверстий выбираются не менее 0,5 мм. Для получения равномерной толщины пленки по окружности сечения камеры число этих отверстий должно быть большим. Поскольку расход жидкости на образование завесы невелик, то перепад давления на этих отверстиях также должен быть малым. Поэтому жидкость в коллектор попадает через устройство, снижающее ее давление (дроссельную шайбу или жиклер-штулку с калиброванным отверстием). Возможен также вариант с подачей жидкости или газа непосредственно из тракта охлаждения через большое число тангенциальных или на-

клонных к оси камеры продольных отверстий. В этом случае длина отверстий получается значительной и на них срывается большой перепад давления (рис. 7,в). Имеются и более сложные конструкции коллекторов завесного охлаждения.

В ЖРДМТ пояс завесы размещается иногда на периферии головки камеры (рис. 8). В днище 2 сверлятся радиальные 4 и тангенциальные 8 отверстия, через которые подается горячее в кольцевую полость, образованную днищем и корпусом камеры 5. Головка и корпус, изготовленные из сплава ниобия с цирконием, могут работать длительное время при расходе на завесу, равном 12% от расхода через камеру.

При запуске двигателя и опережения подачи окислителя в камеру его пары через отверстия могут попасть в полость коллектора завесы. Поэтому на коллекторе устанавливается штуцер для присоединения трубопровода продувки.

Основным требованием к конструкции распределителя является обеспечение

равномерного пристеночного слоя. Поэтому на чертеже распределителя задаются жесткие допуски на шаг, диаметр отверстий и угол их наклона к внутренней поверхности стенки. После изготовления коллектора он проливается на специальном стенде.

Коллектор для ввода жидкости или газа в расширяющуюся часть сопла с целью изменения направления силы тяги разделен на 4 изолированных сегмента, в каждый из которых рабочее вещество поступает по отдельному трубопроводу в момент подачи команды на открытие соответствующего клапана. Отверстия, сообщающие полость коллектора с огневой полостью камеры, сверлятся радиально или даже с некоторым наклоном так, чтобы струи жидкости или газа выходили против направления движения про-

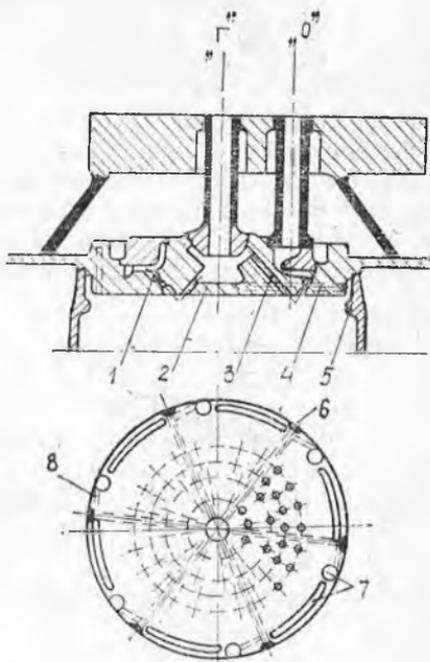


Рис. 8. Схема головки с поясом завесного охлаждения: 1, 3—форсунки; 2 — внутреннее днище; 4, 8 — сверления; 5— корпус; 6 — заглушка; 7 — акустические полости

дуктов сгорания. Давление впрыскиваемого вещества должно быть выше давления газового потока в данном сечении. В результате у стенки в определенной области возникает повышенное давление, создавая неуравновешенное боковое усилие на стенку сопла.

Отбор газа из камеры для привода турбины ТНА или наддув бака может осуществляться через головку камеры (рис. 9, а). С целью охлаждения газа в патрубке отбора дополнительно впрыскивается горючее. Однако при такой конструкции загромождается головка и создается неравномерная расходонапряженность по поперечному сечению камеры. Поэтому более предпочтительным является отбор газа, осуществляемый с помощью коллектора, устанавливаемого вблизи головки (рис. 9, б). Хотя температура газа в камере в этом месте ниже, чем за фронтом пламени, тем не менее она будет все еще выше допустимой по соображениям

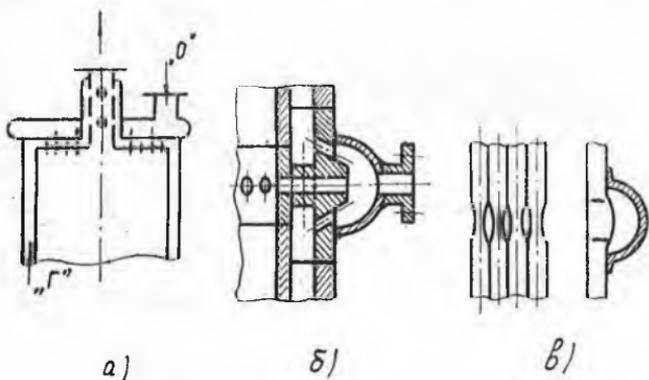


Рис. 9. Коллекторы отбора газа из камеры

обеспечения прочности лопаток турбины. Поэтому в полость коллектора из охлаждающего тракта по большому числу отверстий малого диаметра поступает охладитель, снижающий температуру газа. В оболочке трубчатой конструкции отверстия для отбора газа из камеры получают местным обжатием трубок (рис. 9, в).

3. Крепления камеры

На камере располагаются крепления, одни из которых служат для присоединения к ней различных агрегатов, а другие (опоры) — для передачи силы тяги на летательный аппарат. Конструкция и расположение креплений должны быть таковы, чтобы они обеспечивали:

минимальные нагрузки на силовые элементы камеры и летательного аппарата и незначительные их деформации;

минимальные температурные напряжения в элементах конструкции;

удобство монтажа и обслуживания.

Сами крепления должны иметь достаточную жесткость, чтобы обеспечить заданное взаимное расположение соединяемых агрегатов. Крепления агрегатов к камере выполняются в виде кронштейнов, приваренных к головке или к корпусу, или же в виде приливов с отверстиями (бобышек) на элементах конструкции.

Камера двигателя не должна включаться в силовую систему летательного аппарата. Поэтому опоры камеры располагаются в виде одного силового пояса. Число, место расположения и конструкция опор зависят от назначения, величины силы тяги, габаритов двигателя, назначения летательного аппарата и других факторов.

Специфическим требованием, предъявляемым к опорам камеры, является обеспечение высокой точности совпадения осей камеры и летательного аппарата или же заданной величины угла между этими осями. Это необходимо для получения расчетной траектории полета летательного аппарата непосредственно после старта, когда система управления еще не в состоянии работать эффективно, а в дальнейшем — для снижения нагрузок на исполнительные органы управления. Указанное требование выполняется путем соответствующего расположения опор относительно оси камеры.

Опоры делятся на два вида:

обеспечивающие неподвижную установку камеры относительно ЛА;

обеспечивающие возможность поворота камеры для создания управляющих моментов.

При неподвижной установке камеры в качестве опор используются кронштейны, которые выполняются в виде приливов силового кольца головки (рис. 10,а) или в виде отдельных сборочных единиц, состоящих из корпуса и сваренной с ним втулки с отверстием под крепежный болт. Корпус кронштейна приваривается к силовому кольцу головки и рубашке (рис. 10,б) или только к рубашке (рис. 10,в). При небольшой толщине рубашка в месте приварки кронштейнов усиливается с помощью бандажа. Корпус кронштейна для повышения жесткости имеет коробчатое сечение и изготавливается обычно из листового материала.

Для ЖРД летательных аппаратов, совершающих в полете быстрые маневры (ракеты класса «земля—воздух», «воздух—воздух»), пояс опор желательно располагать вблизи центра тяжести камеры (приблизительно в конце цилиндрического участка корпуса). При таком расположении снижается величина изгибающих моментов, действующих на корпус и сами опоры при возникновении боковых ускорений.

Если стенки камеры во время работы сильно нагреваются (например, при одностенном корпусе, охлаждаемом аккумуляцией тепла), опоры следует располагать на менее нагретой головке.

Некоторые опоры имеют промежуточные элементы, позволяющие регулировать положение камеры относительно летательного аппарата. В этом случае опора (рис. 10, г) представляет собой стакан 7, приваренный к камере, в котором собрано регулирующее устройство. Оно состоит из шаровой пяты 5, подпятника 6, двух эксцентричных колец — внутреннего 4 и внешнего 8, накидной гайки 3 с прокладкой 9 и контргайки 2. Хвостовик шаровой пяты крепится на резьбе и отверстии силовой рамы 1. Ввинчивая или вывинчивая хвостовики, можно менять расстояние между рамой и камерой, а также угол между осями камеры и летательного аппарата. Поворот колец 4 и 8 относительно друг друга позволяет смещать камеру относительно рамы в поперечном направлении.

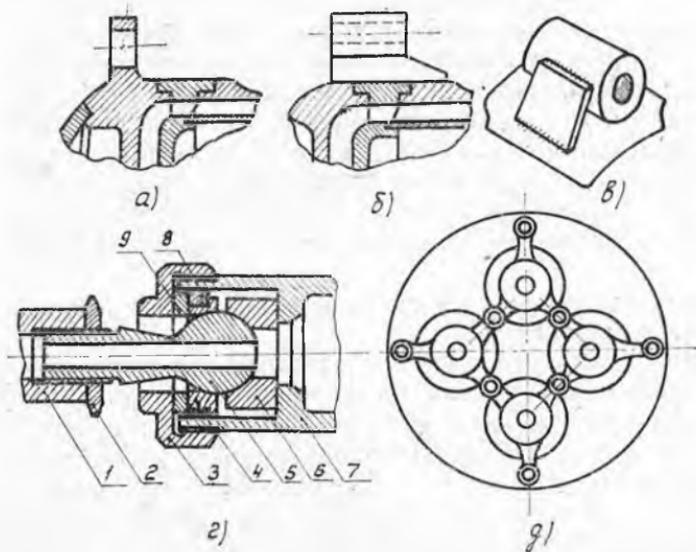


Рис. 10. Опоры неподвижных камер

Применение регулируемых опор позволяет упростить технологию приварки кронштейнов.

На камере обычно устанавливается от двух до четырех кронштейнов, передающих тягу. При многокамерной компоновке одни кронштейны служат для соединения между собой, а другие — для крепления камер к силовой раме (рис. 10, д). Сопла камер в этом случае объединяются с помощью креплений, допускающих их сме-

шение относительно друг друга для обеспечения свободы термических деформаций. Если диаметр среза сопла гораздо больше диаметра камеры сгорания, то каждая камера крепится к раме отдельно, а сопла объединяются теплозащитным экраном.

Силовая рама является промежуточным элементом, применяемым в случаях, когда поперечные размеры камеры гораздо меньше размеров летательного аппарата, или при использовании многокамерных или блочных двигателей, или, наконец, при необходимости распределения силы тяги по окружности корпуса летательного аппарата во избежание значительных его местных деформаций. Конструкция рамы зависит от числа камер или блоков, от способа их крепления, числа и размеров других агрегатов двигателя. Обычно она представляет собой ферменную конструкцию (рис. 11) и состоит из двух или даже трех поясов. Верхний пояс служит для присоединения рамы к корпусу ЛА, нижний — для крепления к ней камер, а средний — для крепления ТНА и других агрегатов.

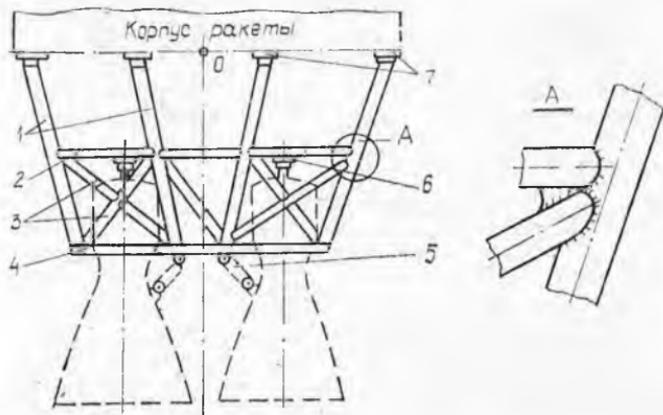


Рис. 11. Рама двигателя: 1 — силовые стойки; 2 — средний пояс; 3 — раскосы; 4 — нижний пояс; 5 — гидроцилиндр; 6 — шарнирная опора камеры; 7 — опоры верхнего пояса рамы

Если основной двигатель выполняет также и функции рулевого, то опоры должны обеспечить возможность его поворота в одной или двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Такие опоры располагаются или сверху, в центре головки, или же по бокам камеры, обычно — в конце цилиндрического участка корпуса, а иногда — в зоне критического сечения сопла.

В первом случае опора имеет меньшие размеры и массу, чем во втором, но при этом растет момент инерции поворота камеры, так как

центр ее тяжести удален от оси поворота. Для уменьшения времени отклонения камеры необходимо увеличивать мощность и, следовательно, массу привода. Во втором случае ось поворота и центр тяжести камеры расположены значительно ближе друг к другу, но габариты и масса опоры будут значительно большими.

Опора, размещенная на голове и обеспечивающая поворот камеры только в одной плоскости, представляет собой шарнир (рис. 12, а). Если же необходимо обеспечить поворот камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то используется универсальный шарнир (рис. 12, б) или же шаровая пята (рис. 12, в). Для уменьшения силы трения в шарнирах применяются подшипники скольжения в виде втулок, покрытых фторопластом, двухсернистым молибденом, или же подшипники качения (см. рис. 6, [1]).

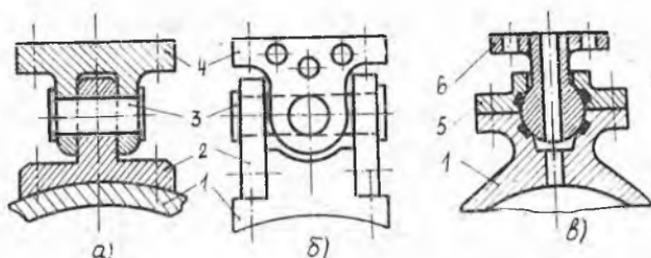


Рис. 12. Схемы конструкций опор поворотных камер: а) — шарнир; б) — универсальный шарнир; в) — шаровая пята; 1 — днище головки; 2 — кронштейн камеры; 3 — ось; 4 — кронштейн рамы; 5 — крышка подпятника; 6 — фланец шаровой пяты

Иную конструкцию имеет опора, расположенная на корпусе камеры. При повороте камеры в одной плоскости опора представляет собой силовое кольцо, приваренное к корпусу, с двумя цапфами, вращающимися в подшипниках качения, которые устанавливаются в гнездах рамы двигателя (см. рис. 12, [1]). При повороте камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях приходится использовать промежуточную раму, в которой устанавливаются подшипники цапф камеры. Цапфы промежуточной рамы располагаются под углом 90° к цапфам камеры и вращаются в подшипниках рамы двигателя (рис. 13). С целью уменьшения габаритов и массы рамы такая опора размещается в зоне критического сечения камеры. Промежуточная рама (рис. 14) состоит из пустотелых секций 1, 2, имеющих гнезда 4 под подшипники пустотелых цапф 3 и 9 рамы двигателя 16, и пустотелых цапф 6 и 15, вращающихся в подшипниках кронштейнов 7 камеры 13.

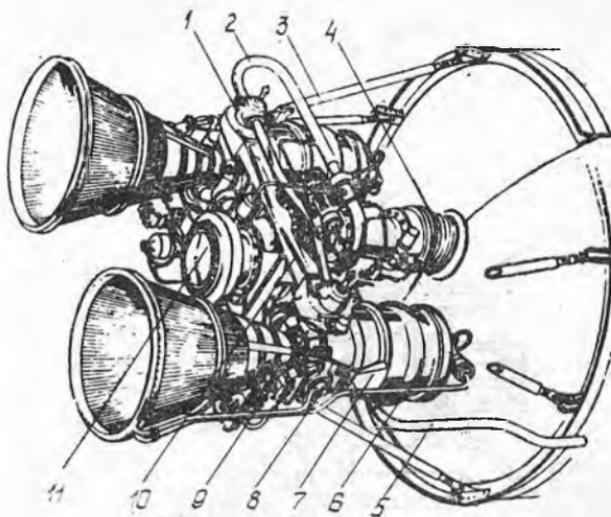


Рис. 13. Компоновка двигателя с двумя поворотными камерами на карданной опоре: 1 — поля цапфа для подвода окислителя в камеру; 2 — трубопровод подачи окислителя; 3 — стойка рамы двигателя; 4 — сильфон; 5 — трубопровод подачи горючего; 6 — камера; 7 — кронштейн камеры; 8 — поля цапфа для подвода горючего в камеру; 9 — промежуточная рама кардана; 10 — рама двигателя; 11 — ТНА

Поворот камеры относительно промежуточной рамы осуществляется гидроцилиндрами 5, штоки поршней которых действуют на рычаги 8 кронштейнов камеры, а поворот промежуточной рамы относительно рамы двигателя — гидроцилиндрами 11. Окислитель через отсечной клапан 2, цапфу 3 и канал в секции 1 поступает в цапфу 15, а через прорези в ней и коллектор 14 — в тракт охлаждения и головку камеры. Горючее поступает в головку через отсечной клапан 10, цапфу 9, канал секции 12, цапфу 6, коллектор, трубопроводы и пусковой клапан. Коллекторы цапф имеют соответствующие подвижные уплотнения.

В конструкциях, не имеющих полых цапф, подвод компонентов к поворотным камерам осуществляется с помощью гибких шлангов или сильфонов, которые устанавливаются на стыках трубопроводов, идущих от баков, с трубопроводами или фланцами агрегатов, укрепленными на камере. Эти стыки следует размещать возможно ближе к центру поворота камеры, что ведет к уменьшению деформации сильфонов, облегчению условий их работы и к снижению мощности привода.

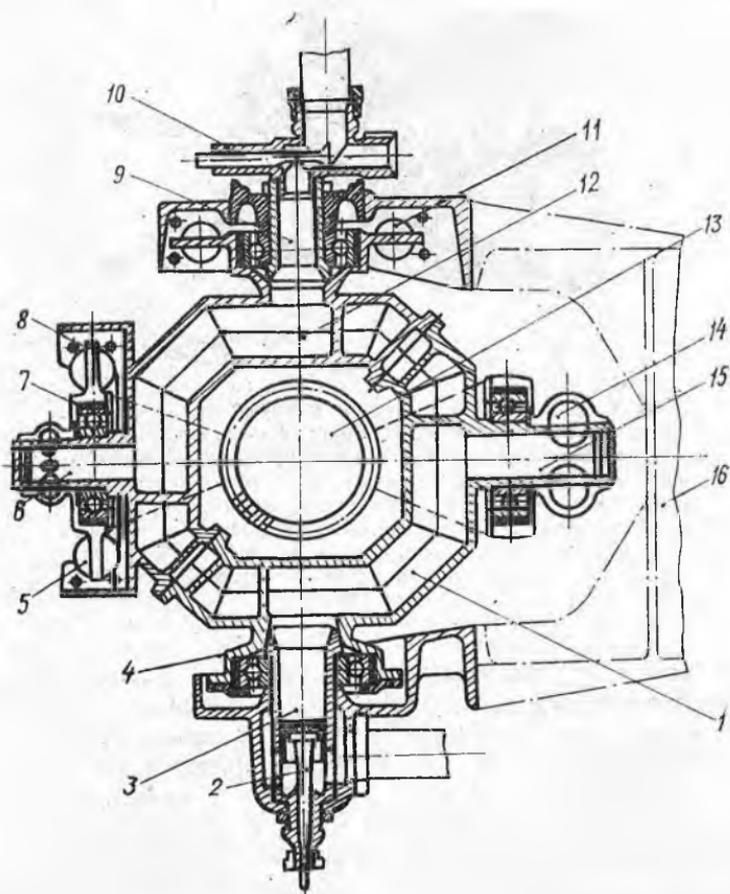


Рис. 14. Промежуточная рама карданной опоры камеры: 1, 12 — пустотелые секции; 2, 10 — отсечные клапаны; 3, 6, 9, 15 — пустотелые цапфы; 4 — гнездо под подшипник промежуточной рамы; 5, 11 — гидроцилиндры; 7 — кронштейн камеры; 8 — рычаг для поворота камеры относительно промежуточной рамы; 13 — камера; 14 — коллектор; 16 — рама двигателя

При этом опора может иметь конструкцию, изображенную на рис. 15. Кольцо коробчатого сечения 1 крепится кронштейнами 2 и 3 к раме двигателя и к корпусу камеры. Внутри кольца на каждом кронштейне смонтирован узел поворота, состоящий из оси 5, гаек 4, шара 7, покрытого твердой смазкой, и крышки 6, закрепляющей шар в кронштейне со скольжением. Место входа кронштейнов в кольцо уплотнено сальниками 8.

К головке или рубашке камеры должны быть приварены кронштейны для крепления штоков поршней гидроцилиндров, а также стопоры, фиксирующие камеру относительно рамы при транспортировке и установке на летательный аппарат.

4. Сборка камеры

Сборка камеры заключается в присоединении головки, опор и соплового насадка к корпусу камеры. Последовательность сборки камеры зависит от ее конструкции. Если головка и сопловой насадок съемные, то сначала к корпусу привариваются крепления агрегатов, трубопроводов и опоры камеры, а затем устанавливаются съемные элементы. При цельносварной конструкции сначала приваривается головка, узлы крепления и в конце — насадок.

На сборочном чертеже камеры должны быть указаны:

размеры, предельные отклонения и другие требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы при сборке; требования, оговаривающие условия сборки, регулировки, испытаний и подготовку к хранению;

указания о характере сопряжений, неразъемных соединений и методах их выполнения;

помера позиций составных частей;

присоединительные, габаритные и справочные размеры;

при необходимости — координаты центра тяжести,

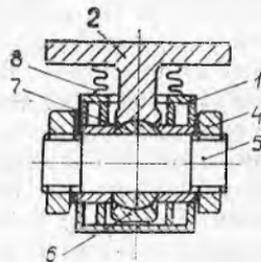
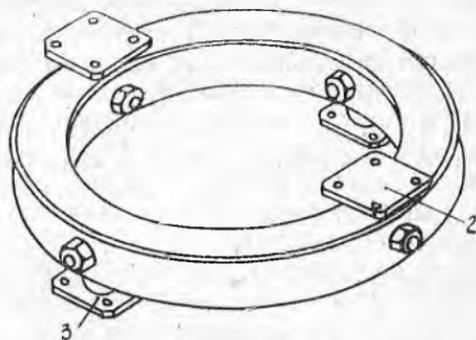


Рис. 15. Карданная опора с шаровыми подшипниками

Сборочный чертеж должен быть выполнен в таком количестве проекций, чтобы были совершенно ясны устройство камеры, конструкция отдельных деталей, их взаимное расположение и соединение. Обычно на чертеже изображается продольный разрез камеры и вид со стороны головки, которые дают возможность показать как линейную, так и угловую координацию деталей. Кроме того, на чертеже должны быть изображены местные разрезы, сечения, вырывы, виды по стрелкам, позволяющие выяснить все особенности сборки этих мест.

При соединении головки с корпусом необходимо обеспечить совпадение оси суммарного факела распыливания компонентов топлива с осью корпуса. Для этого задаются жесткие допуски на радиальные и торцовые биения посадочных поверхностей соединяемых деталей, которые выдерживаются при обточке этих поверхностей под сварку. Вместе с тем должна быть обеспечена и заданная угловая координация различных элементов, расположенных на головке, относительно базы, выбранной на корпусе (например, относительно фланцев патрубков подводящего коллектора) с помощью различных фиксирующих устройств сварочного приспособления. Таким же способом фиксируются и различные кронштейны и опоры, привариваемые к корпусу.

Положение стыковочных поверхностей опор или осей цапф по высоте камеры координируется относительно торца корпуса на срезе сопла, а угловое их расположение — относительно выбранной базы. При этом задаются жесткие допуски на положение стыковочных поверхностей, осей отверстий кронштейнов и осей цапф относительно оси камеры, которые выдерживаются, как уже упоминалось ранее, с помощью фиксаторов сварочного приспособления и, если необходимо, обеспечиваются последующей механической обработкой: фрезерованием стыковочных поверхностей, сверлением отверстий по кондукторам, обточкой цапф.

При соединении соплового насадка с корпусом также должно быть обеспечено с заданной точностью совпадение их осей.

После сборки камера подвергается гидро- и пневмоопрессовкам. При этом глушатся все отверстия, кроме одного, и устанавливается герметизирующая заглушка в критическом сечении камеры. После опрессовки производится проливка трактов горячего и окислителя, промывка и сушка камеры и, если необходимо, обезжиривание. По окончании этих операций камера подготавливается к транспортировке в цех сборки или к хранению, для чего отверстия закрываются пробками и заглушками. С целью удаления влаги из внутренних полостей перед постановкой заглушки в критическом сечении внутрь огневой полости закладывается осушитель (силикагель).

Контрольные вопросы

1. Как выбираются исходные данные для расчета системы проточного охлаждения (материала стенки, $T_{сг}$, h , вида охладителя, схемы его течения в тракте охлаждения, размеров тракта)?
2. Назначение коллекторов, схема классификации, требования к ним, порядок проектирования, технология изготовления и испытания.
3. Назначение креплений камеры, схема классификации, требования, материал для изготовления деталей.
4. Назначение и конструкция силовой рамы двигателя.
5. Порядок сборки камеры и технические требования на сборку и испытания.

Л и т е р а т у р а

1. Конструкция головки камеры двигателя: Методические указания к лабораторной работе. — Куйбышев: КуАИ, 1982.
2. Конструкция корпуса камеры двигателя: Методические указания к лабораторной работе. — Куйбышев: КуАИ, 1982.
3. Пичугин Д. Ф. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Конспект лекций. ч. 3. — Куйбышев: КуАИ, 1975.

Составитель *Дмитрий Федорович Пичугин*

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КАМЕР ДВИГАТЕЛЕЙ

Методические указания к лабораторной работе № 1

Редактор *М. И. Логунова*

Техн. редактор *Н. М. Каленюк*

Корректор *Г. А. Усачева*

Сдано в набор 27.12.82 г. Подписано в печать 30.12.82 г.

Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.

Высокая печать. Гарнитура Л1-10. Усл. п. л. 1,5.

Уч.-изд. л. 1,63. Тираж 450 экз. Заказ № 2.

Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени

авиационный институт им. С. П. Королева.

г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

КОНСТРУКЦИЯ ГОЛОВКИ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы — изучение конструкции головок камер.

Домашнее задание

1. Изучить материал данного указания.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Аудиторное задание

1. Изучить конструкцию головок камер заданных двигателей, зарисовать их конструктивные схемы с делением на основные сборочные единицы.
2. Выбрать и обосновать выбор типа форсунок и головки камеры проектируемого двигателя, зарисовать их конструктивные схемы с членением на основные сборочные единицы.
3. Сделать эскиз головки со всеми устройствами, расположенными на ней, обратив особое внимание на способы их соединения.
4. Записать марки материала, способы изготовления и виды соединений деталей в сборочных единицах.
5. Рассмотреть порядок сборки основных сборочных единиц и всей головки, виды их «холодных» испытаний и ТУ на сборку и испытания.

ГОЛОВКИ КАМЕР

Назначением смесительной головки камеры является подготовка топлива к сгоранию, т. е. организация смесеобразования в камере сгорания. В процессе смесеобразования происходит подача компонентов топлива в камеру сгорания в виде отдельных струй, дробление этих струй на мелкие капли, перемешивание компонентов с образованием однородной смеси и испарение капель. От качества смесеобразования зависит устойчивость горения топлива, полнота и время его сгорания.

Для получения высокого качества смесеобразования при создании головки необходимо обеспечить:

равномерную расходонапряженность, т. е. равномерный расход топлива по поперечному сечению камеры с целью уменьшения потерь на радиальное перетекание газов;

заданное соотношение компонентов топлива по поперечному сечению камеры;

дробление струи жидких компонентов на достаточно мелкие и однородные капли в целях их быстрого и одновременного испарения;

хорошее смешивание компонентов при возможно меньшей длине этой зоны;

параллельное и симметричное относительно оси камеры сгорания направление оси факела распыливания;

возможно меньшую склонность к возникновению в камере неустойчивого горения;

защиту стенки камеры и внутреннего днища головки от прогара; возможно меньшие гидравлические потери давления в полости головки;

достаточную жесткость конструкции при ее минимальной массе.

Все эти задачи решаются рациональным размещением распыливающих устройств (форсунок), выбором соответствующих размеров деталей, их материала, схемы силовой системы головки и принятием определенных конструктивных решений.

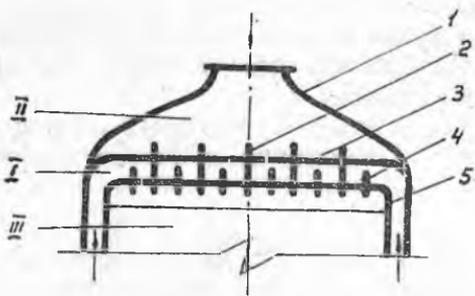


Рис. 1. Схема головки камеры, работающей на двухкомпонентном топливе

Почти все современные ЖРД работают на двухкомпонентных топливах. Головки таких двигателей (рис. 1) имеют две полости — наружную II и внутреннюю I, сообщающиеся огневой полостью камеры II посредством каналов в форсунках 2 и 4. Обычно полости образуются днищами головки — наружным I, средним 3 и внутренним 5. Внутреннее, среднее днище и форсунки составля-

ют сборочную единицу, называемую форсуночным блоком. Один из компонентов топлива подводится в наружную полость через патрубок наружного днища, а другой — во внутреннюю полость и тракта охлаждения корпуса камеры или из специального коллектора. Кроме форсунок на головке могут быть размещены запальные устройства, коллекторы подвода компонентов, штуцера замер-

давления компонентов перед форсунками, клапаны и крепления камеры к ЛА. Головка соединяется с корпусом камеры.

1. Конструкция форсунок

Форсунки обеспечивают ввод топлива в камеру сгорания и дробление струй на мелкие капли (распыливание жидкости) с целью быстрого их испарения.

Основными требованиями, предъявляемыми к форсункам, являются обеспечение необходимого расхода и возможно более тонкого распыла при заданном перепаде давления, простота конструкции и технологичность изготовления.

Форсунки можно классифицировать по следующим основным признакам (рис. 2):

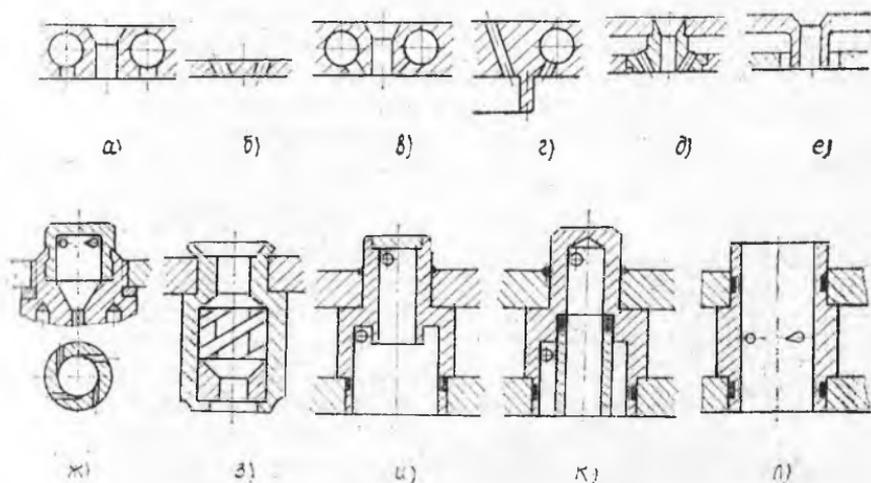


Рис. 2. Схемы форсунок: струйных однокомпонентных с параллельными (а) и со сталкивающимися струями одного (б) и двух (в) компонентов, со струями, ударяющимися в кольцевой отражатель дна (г), двухкомпонентных со сталкивающимися (д) и параллельными (е) струями: центробежных однокомпонентных с тангенциальными отверстиями (ж) и шнековых (з), двухкомпонентных с внутренним (и) и внешним (к) смещением, комбинированной (л)

по числу распыливаемых компонентов — одно- и двухкомпонентные;

по принципу действия — струйные, подающие жидкость в камеру сгорания в виде струи; центробежные, в которых жидкость закручивается и вследствие действия центробежных сил вытекает из сопла в виде конической пленки; комбинированные — струйно-центробежные;

по технологии изготовления — выполненные непосредственно сверлением форсуночного блока или в виде отдельной детали; в последнем случае — по способу крепления в форсуночном блоке — на резьбе, с помощью развальцовки торцев или с помощью пайки.

Двухкомпонентная форсунка при одинаковых внешних размерах с однокомпонентной обеспечивает больший расход компонента, что позволяет уменьшить диаметр камеры сгорания или, при заданном диаметре, уменьшить число форсунок. Вместе с тем, они более сложны в изготовлении, и внутреннее днище, менее равномерно прикрытое конусами распыла, должно иметь усиленное охлаждение.

Струйные форсунки целесообразно применять для подачи в камеру сгорания самовоспламеняющихся или легкоиспаряющихся и газообразных компонентов (особенно при большой расходонапряженности камеры), а центробежные — для подачи плохо испаряющихся компонентов топлива. При одинаковых условиях расход через струйную форсунку выше, чем через центробежную.

Наряду со струйными и центробежными форсунками в головках камер ЖРД иногда применяются комбинированные струйно-

центробежные форсунки. Однокомпонентные комбинированные форсунки применяются в тех случаях, когда необходимо увеличить расход компонента через форсунку или создать растянутый фронт пламени¹, так как при том же перепаде давления дальнобойность струйной форсунки больше, чем центробежной. Двухкомпонентные комбинированные форсунки целесообразно применять в газожидкостных головках, когда газообразный компонент подается через струйную, а жидкий (особенно — плохо испаряющийся) компонент — через центробежную форсунку.

С целью изменения расхода компонентов топлива в камеру иногда применяются форсунки с изменяемым проходным сечением. Так, в головке камеры, изображенной на рис. 3, про-

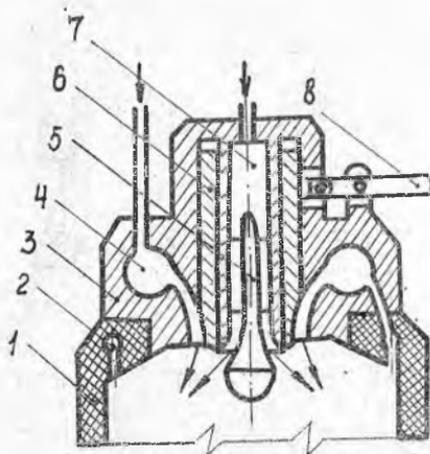


Рис. 3. Схема головки с двухкомпонентной регулируемой форсункой: 1—корпус камеры из стеклопластика; 2—коллектор завесного охлаждения; 3—корпус головки; 4—коллектор горючего; 5—центральное тело; 6—регулирующая втулка; 7—полость окислителя; 8—рычаг

¹ Фронтом пламени называется участок камеры сгорания, на котором происходит интенсивное горение топливной смеси.

ходные сечения двухкомпонентной форсунки изменяются перемещением втулки b с помощью рычага δ , связанного с регулятором расхода компонентов. В результате одновременного изменения расхода компонентов топлива специальным регулятором и проходного сечения форсунки на ней сохраняется расчетный перепад давления, что обеспечивает одинаковое качество распыла топлива на разных режимах работы камеры.

Конструктивное оформление форсунок может быть весьма разнообразным. Центробежные и комбинированные форсунки изготавливаются в виде отдельных деталей или сборочных единиц. Открытые тангенциальные форсунки, у которых диаметр сопла d_c равен диаметру камеры закручивания $d_{кз}$, изготавливаются в виде одной детали, а закрытые ($d_c < d_{кз}$) — сборными, состоящими из корпуса и донышка или втулки с тангенциальными отверстиями и корпуса с соплом. В последнем случае, проводя отдельно прошивку гидравлических каналов втулки и сопла, можно путем селективной сборки легко получить заданные параметры форсунок. Крепление элементов форсунки друг к другу может быть осуществлено запрессовкой, завальцовкой торца корпуса или пайкой. Во всех случаях крепление не должно мешать движению компонентов по каналу форсунки.

Резьбовое крепление форсунок в форсуночном блоке усложняет технологию изготовления и сборки головки и в настоящее время применяется редко (при малом числе форсунок и литом форсуночном блоке). Развальцовка торцев форсунок не всегда обеспечивает герметичность соединения. Поэтому в настоящее время форсунки крепятся с помощью пайки. Для этого их посадочные поверхности покрываются твердым припоем или же на них делаются канавки, в которые закладываются колечки припоя.

Материалами для изготовления форсунок служат нержавеющие (при агрессивных компонентах) или легированные стали и медные сплавы. Следует иметь в виду, что параметры центробежных форсунок весьма чувствительны к отклонениям в технологии изготовления гидравлических каналов, так как толщина пленки жидкости в камере закручивания и в сопле соизмерима с возможными технологическими погрешностями. Поэтому отверстия в однокомпонентных форсунках (особенно с малым расходом) изготавливаются в 5—7 квалитетах точности и с шероховатостью 1,25 мкм. Двухкомпонентные форсунки, обычно имеющие большой расход, могут изготавливаться в 8—9 квалитетах. В тангенциальных форсунках входные отверстия должны выходить в камеру закручивания строго по касательной к ее поверхности.

В технических требованиях на изготовление форсунки указываются допустимые отклонения от заданной в чертеже ее геометрии (бесие внутренние и посадочные поверхности, перпенди-

кулярность торца сопла его оси, неравномерность шага тангенциальных отверстий и т. д.). После изготовления форсунок производится их тщательный контроль, который заключается в осмотре, проверке посадочных и свободных размеров и в проливке на специальном стенде, где замеряются такие параметры, как расход, неравномерность расхода по окружности конуса распыливания и величина угла этого конуса при заданном перепаде давления. Для центробежных форсунок допуск на расход составляет 3—5%. Если расход через форсунку меньше заданного, его можно увеличить снятием фасок на входных отверстиях.

2. Конструкция смесительных головок

Головки можно классифицировать по следующим основным признакам:

виду топлива и фазовому состоянию подаваемых в камеру компонентов;

форме форсуночного блока;

типу смесительных элементов и расположению их на внутреннем днище;

способу соединения головки с корпусом камеры;

технологии изготовления.

По виду топлива головки могут быть одно- и двухкомпонентные, а по фазовому состоянию компонентов — жидкостные, газожидкостные и газовые.

Форсуночный блок головки по форме может быть сферическим, коническим, цилиндрическим или плоским.

Смесительным элементом называется группа форсунок горючего и окислителя, которая обеспечивает смешение компонентов топлива при заданном их соотношении. Простейшим смесительным элементом является двухкомпонентная форсунка. При использовании однокомпонентных форсунок смесительный элемент образуется в результате расположения их в определенном порядке относительно друг друга (шахматном, сотовом или концентричном).

Распределение смесительных элементов по площади внутреннего днища выбирается чаще всего равномерным. Однако в целях повышения устойчивости процесса горения иногда их размещают в виде отдельных групп (гнезд).

Соединение головки с корпусом камеры может быть разъемным и неразъемным. В первом случае конструкция камеры усложняется, так как необходимо обеспечить надежное уплотнение стыков головки с корпусом. Применение разъемного соединения целесообразно в том случае, когда существует необходимость в переборке камеры (например, после испытаний или в двигателях большого ресурса, если имеющую большой срок работы головку можно ис-

пользовать с другим корпусом камеры). Неразъемное соединение головки с корпусом обеспечивается с помощью сварки или пайки. Оно конструктивно проще, легче и надежнее в работе.

По технологии изготовления головки могут быть разборными и неразборными (литыми, сварными и паяно-сварными).

Головка со сферическим форсуночным блоком и размещением форсунок отдельными группами показана на рис. 4. В центре головки

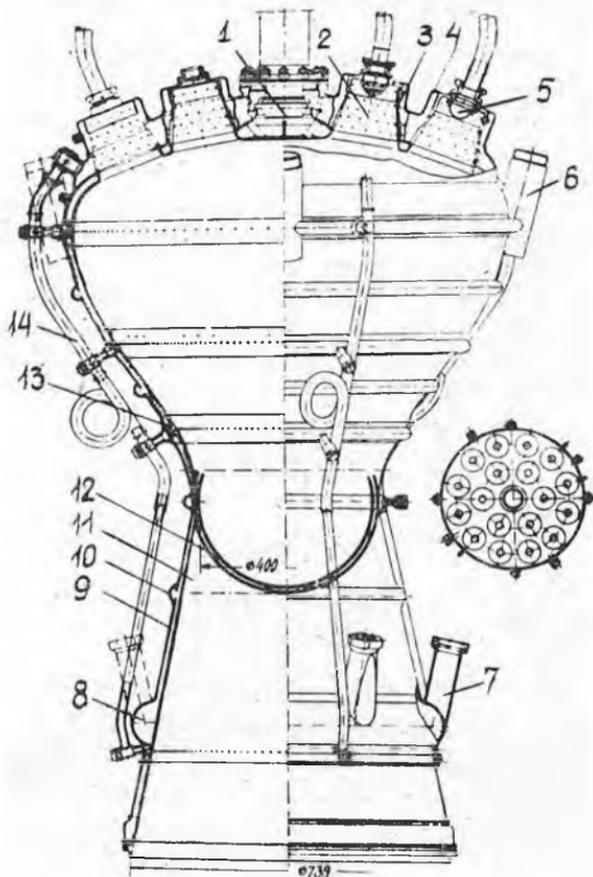


Рис. 4. Камера ЖРД ракеты А-4 (Германия): 1 — главный клапан горючего; 2 — пояса форсунок горючего; 3 — корпус предкамеры; 4 — кожух предкамеры; 5 — распылитель кислорода; 6 — опора камеры; 7 — патрубок подвода горючего; 8 — входной коллектор тракта охлаждения; 9 — рубашка корпуса; 10 — гофровый компенсатор; 11 — стенка корпуса; 12 — ограничитель зазора между стенками; 13 — пояс завесного охлаждения; 14 — трубка подачи горючего к поясам завес

расположен главный клапан горючего 1, а вокруг него по двум концентрическим окружностям — 18 форсуночных гнезд (предкамер). В центре корпуса 3 предкамеры установлен распылитель 5 с большим числом струйных форсунок, подающих окислитель. При открытии клапана 1 горючее из тракта охлаждения корпуса камеры поступает в полость, образованную корпусами предкамер и их кожухами 4, а отсюда через пояса 2 центробежных и струйных форсунок — внутрь предкамеры, где и происходит его смешение с окислителем.

Головка с коническим форсуночным блоком изображена на рис. 5. Струйные двухкомпонентные форсунки расположены на внутреннем днище по концентрическим окружностям, причем струя жидкого кислорода в каждой форсунке окружена кольцевой струей газообразного водорода. В центре головки расположен воспламенитель с электроискровым зажиганием. Среднее днище с форсунками кислорода изготовлено механической обработкой из поковки, внутреннее и наружное днища — из листового материала и приварены к среднему днищу. При этом цилиндрические выступы среднего днища, в которых просверлены форсунки окислителя, входят в отверстия внутреннего днища с определенным зазором, образуя кольцевые щели форсунок горючего.

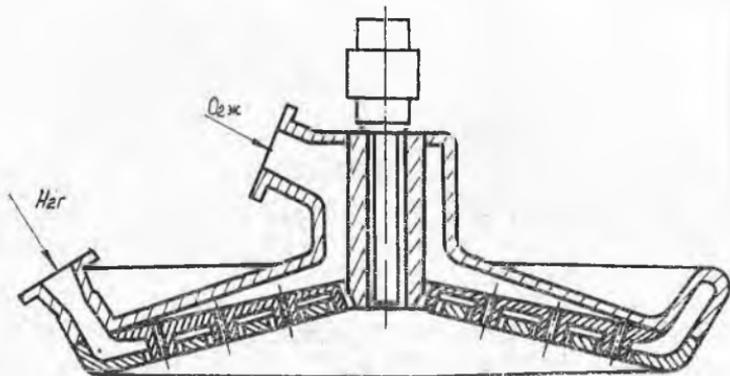


Рис. 5. Схема конической головки

Головка с цилиндрическим форсуночным блоком (рис. 6) применена в камере ЖРД, работающего на самовоспламеняющихся компонентах. Окислитель через трубопровод 1 поступает в полость, образованную наружным 3 и внутренним 4 днищами, и через сверления на периферии днища 4 впрыскивается в камеру в осевом направлении. Горючее, поступающее через трубопровод 10 в коллектор 6, впрыскивается в камеру в радиальном направлении через струйные форсунки, расположенные в кольцевых проточках

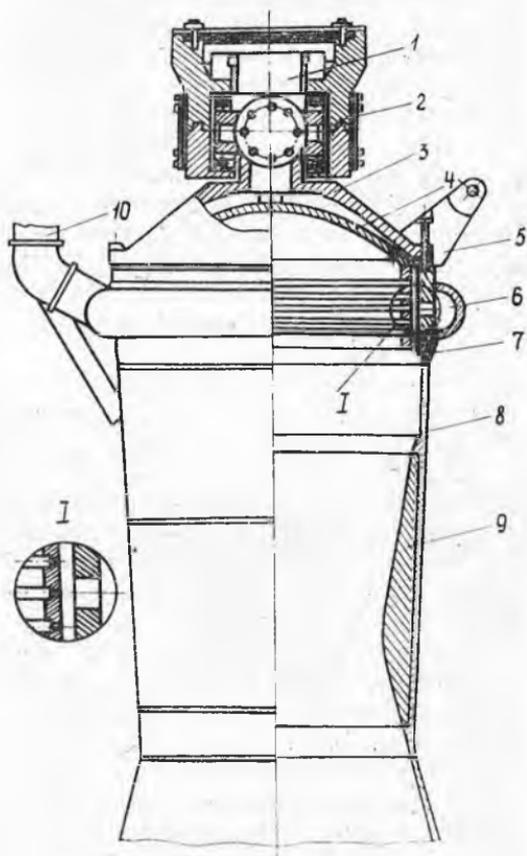


Рис. 6. Схема камеры с цилиндрической головкой и одностенным корпусом: 1, 10 — трубопроводы подвода окислителя и горючего соответственно; 2 — шарнирная опора; 3, 4 — наружное и внутреннее днища; 5 — кронштейн для крепления штока гидrocиллиндра; 6 — коллектор; 7 — пояс завесного охлаждения; 8 — корпус камеры; 9 — графитовая вставка

распределителя коллектора. Таким образом, струи горючего и окислителя сталкиваются под углом 90° . Такая конструкция обеспечивает высокую расходонапряженность головки и позволяет уменьшить длину камеры сгорания.

Преимуществами головок с неплоской формой форсуночного блока являются:

большая прочность и жесткость блока;

меньшая склонность к возникновению неустойчивого горения в камере (фронт пламени получается растянутым по ее длине); возможность размещения большого числа форсунок (поверхность внутреннего днища неплоского блока больше, чем плоского).

Недостатками же таких головок являются сложность изготовления, неравномерная расходонапряженность по сечению камеры и трудность создания пристеночного слоя. Поэтому все же чаще применяются головки с плоским форсуночным блоком.

Плоский форсуночный блок проще в изготовлении по сравнению с неплоским. Он позволяет обеспечить равномерную расходонапряженность, заданное соотношение компонентов по сечению камеры и создать с помощью периферийных форсунок пристеночный слой.

Недостатками этого блока являются меньшая жесткость и трудность размещения запального устройства, которое будет нарушать принятую схему расположения форсунок. Поэтому в головках с плоским форсуночным блоком целесообразно применять химическое или пиротехническое зажигание с помощью пиросвеч, установленных на корпусе камеры. При использовании электроискрового воспламенителя необходимо по возможности ограничивать площадь, занимаемую им на внутреннем днище.

Плоский форсуночный блок может быть изготовлен литьем (штамповкой) с последующей механической обработкой или из листовых материалов путем пайки и сварки. Литой форсуночный блок (см. рис. 12) представляет собой диск, имеющий внутри систему радиальных и кольцевых каналов для подвода к форсункам одного из компонентов. Другой компонент подводится к форсункам из полости, образованной диском и наружным днищем, которое приваривается к диску или притягивается вместе с ним к фланцу корпуса камеры болтами. Чаще всего в таких блоках используются струйные форсунки, выполненные в виде сверлений в теле диска. Центробежные форсунки устанавливаются в резьбовых гнездах. Такие форсуночные блоки просты по конструкции, обладают большой жесткостью, но имеют ряд недостатков:

большую массу;

неравномерную расходонапряженность по поперечному сечению камеры, так как трудно обеспечить одинаковое давление перед форсунками, питающимися из разных каналов;

неблагоприятные условия охлаждения блока (толстые днища);

необходимость весьма точного изготовления отверстий, являющихся форсунками.

Для устранения некоторых из этих недостатков применяются дисковые блоки с форсуночными кольцами. Схема такой головки показана на рис. 7. Стальной диск 7 имеет со стороны огневой полости камеры кольцевые пазы, в которые завальцованы или

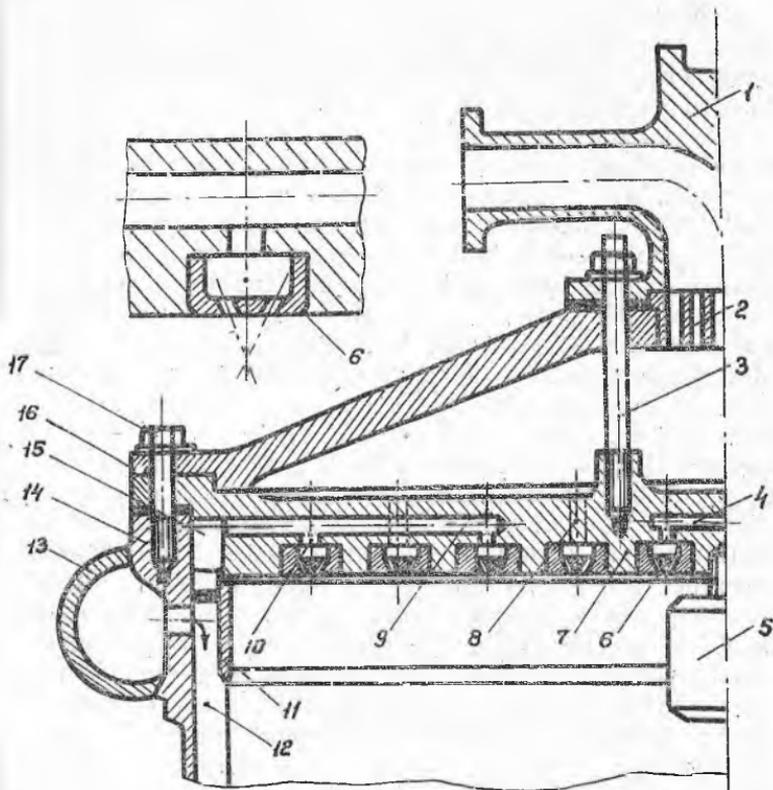


Рис. 7. Схема головки с форсуночными кольцами

нижны форсуночные кольца 6. Двух- и трехструйные форсунки со сталкивающимися струями одного компонента выполнены сверлением форсуночных колец. Окислитель поступает в кольцевые пазы через угловой патрубок, распределительную решетку 2 и бсевые сверления 8. Горючее из входного коллектора 13 тракта охлаждения корпуса камеры проходит в трубки 12, течет в сторону среза сопла и по соседним трубкам возвращается в кольцевую полость 16, из которой поступает в соответствующие кольцевые пазы через радиальные 9 и осевые 10 сверления. Форсуночные кольца горючего и окислителя чередуются. Периферийное кольцо предназначено для подачи горючего, образующего у стенки камеры пристеночный слой. Во внутреннее кольцо по специальному трубопроводу и каналу 4 при запуске подается небольшой расход горючего для образования смеси пускового состава, которая поджигается пиромалом 5. Наружное днище 16 и диск крепятся болтами 17 к фланцу корпуса камеры 14, причем нижняя часть диска вставляет-

ся в гнездо кольца 11, припаянного к трубкам корпуса. Для повышения жесткости диск в центральной части дополнительно соединен с наружным днищем шпильками 3. Все места стыков уплотнены специальными прокладками. На патрубке сверху расположен фланец 1 для крепления узла шарнирного подвеса камеры. Применение форсуночных колец, изготовленных отдельно от блока, позволяет упростить технологию изготовления головок. Поскольку толщина колец и перемычек диска между ними невелика, поверхность диска, соприкасающаяся с горячими газами, хорошо охлаждается (например, температура этой поверхности в одной из головок на номинальном режиме работы составляет 720К). Большое число радиальных и осевых сверлений, через которые компоненты подаются в кольцевые пазы, позволяет обеспечить достаточно равномерную расходонапряженность головки. Однако масса таких головок все же остается большой.

Меньшую массу имеют головки со сварным форсуночным блоком (рис. 8, а), днища которых изготавливаются штамповкой из листового материала и соединяются между собой точечной сваркой по выштамповкам (коническим круглым углублениям в днищах). В центре выштамповок и во внутреннем днище между ними сверлятся отверстия, в которые вставляются и развальцовываются концы шеек однокомпонентных форсунок. К среднему днищу приваривается наружное днище с патрубком подвода компонента. Головка по отбортованным кромкам днищ форсуночного блока сваривается с корпусом камеры: внутреннее днище — непосредственно со стенкой, а среднее днище при помощи соединительного кольца — с рубашкой. Максимальное расстояние между центрами соседних выштамповок выбирается из условия обеспечения прочности участков внутреннего днища между выштамповками, а минимальное — из условия размещения самих форсунок.

В другом варианте (рис. 8, б) днища блока соединяются между собой с помощью форсунок, подающих в камеру компонент из наружной полости головки. Для сохранения постоянной величины зазора между днищами на эти форсунки одеваются распорные втулки.

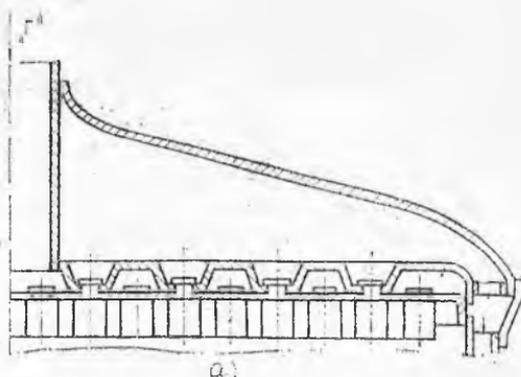
Недостатками сварных головок являются:

необходимость изготовления среднего и внутреннего днищ из свариваемых друг с другом материалов (сталей);

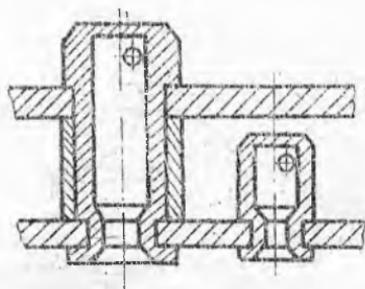
большое гидравлическое сопротивление нижней полости головки, что приводит к появлению неодинакового перепада давления на периферийных и центральных форсунках;

выступление форсунок за внутреннее днище, что при работе на кислороде ведет к их обгоранию;

возможность разгерметизации полостей вследствие ослабления развальцовки форсунок.



а)



б)

Рис. 8. Схема головки со сварным форсуночным блоком (а) и с соединением днащ развальцовкой форсунок (б)

С повышением давления газа в камере сгорания увеличивались и тепловые потоки от продуктов сгорания топлива к внутреннему днищу, что вызывало обгорание форсунок и прогары внутреннего днища, сделанного из материала с низкой теплопроводностью. Это привело к разработке паяно-сварной головки (рис. 9) с плоским форсуночным блоком, в котором внутреннее 8 и среднее 5 днища соединяются между собой посредством пайки форсунок 6, подающих в камеру сгорания компонент из наружной полости головки. Пайка позволяет изготавливать внутреннее днище из более теплопроводного материала, например, из хромистой бронзы. Среднее днище приваривается к корпусу 13 (силовому кольцу) головки. Для придания форсуночному блоку большей изгибной жесткости он соединяется с секциями 2 и 3 наружного днища ребрами 4 (кольцевыми или радиальными). Ребра имеют отверстия для перетекания компонента из одной части верхней полости в другую.

Наружное днище обычно делается сферическим (из одной или нескольких секций), сверху к нему приваривается патрубок с фланцем 1 для подвода одного из компонентов, а также штуцера 12 и 14 для замера давления компонентов перед форсунками. Второй компонент обычно поступает из тракта охлаждения корпуса во внутреннюю полость головки и через форсунки 7 подается в огневую полость камеры. Соединение таких головок с корпусом камеры чаще всего выполняется неразъемным (сварным), причем внутреннее днище и стенка 11 свариваются встык, а силовое кольцо и рубашка 10 — через разъемное соединительное кольцо 9.

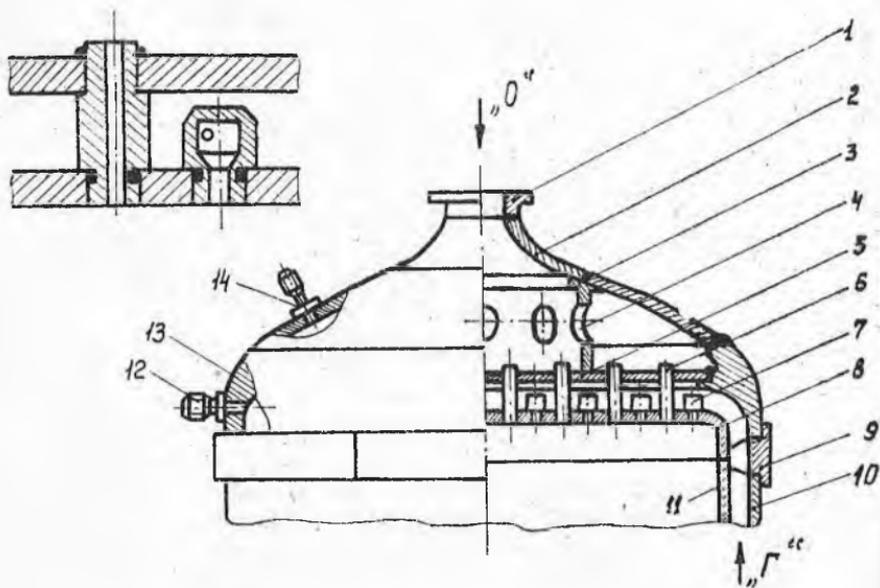


Рис. 9. Схема паяно-сварной головки

Конструкция головки существенно влияет на устойчивость процесса горения топлива в камере. В плоском фронте пламени, который образуется в камере сгорания при плоском форсуночном блоке и одинаковой дальности форсунок, может возникать неустойчивое горение топливной смеси с значительными амплитудами колебаний давления газа. Устранение этого явления осуществляется различными способами. Например, в форсуночном блоке размещают форсунки с различной дальностью, в результате чего фронт пламени получается растянутым по длине камеры, зоны неустойчивого горения, возбуждающие колебания, рассредотачиваются, между возбуждаемыми ими волнами давления возникает сдвиг фаз и колебания уменьшаются. При работе

двигателя на самовоспламеняющихся компонентах устойчивость горения повышается путем загробления распыла струй, для чего в форсуночном блоке устанавливаются большерасходные форсунки.

Другим способом борьбы с колебаниями является установка на внутреннем днище со стороны огневой полости камеры антипульсационных перегородок, которые представляют собой радиальные или кольцевые ребра, разгораживающие пространство камеры у головки на несколько полостей. Неохлаждаемые перегородки представляют собой тонкостенные металлические пластины, приваренные к внутреннему днищу. Длина этих пластин подбирается экспериментально и составляет 50—80 мм. Для уменьшения обгорания желательно, чтобы поверхности пластин омывались с одной стороны только струями одного компонента. В головках двигателей с многократным запуском или длительным временем работы перегородки должны иметь проточное охлаждение. Например, в головке газогенератора (рис. 10) антипульсационные перегородки 6 имеют проточное охлаждение горючим. Внутренние каналы соос-

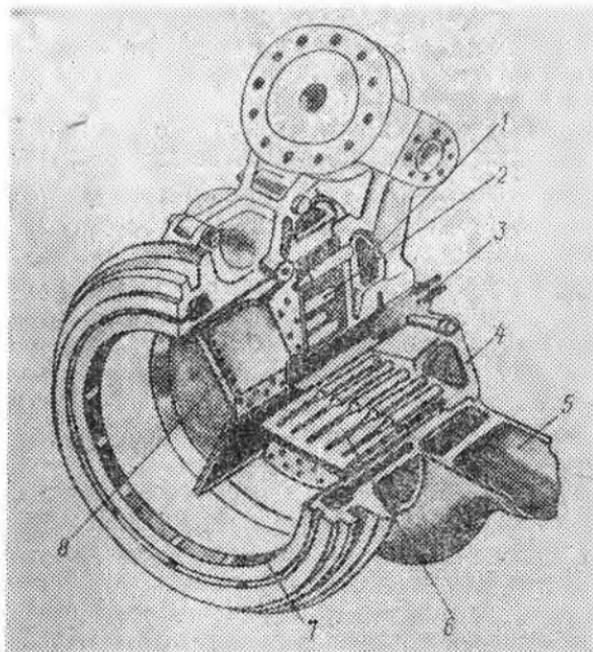


Рис. 10. Головка газогенератора с антипульсационными перегородками и акустическими резонаторами: 1 — подвод окислителя; 2 — форсунки окислителя; 3 — полость воспламенителя; 4 — корпус головки; 5 — подвод горючего; 6 — антипульсационные охлаждаемые перегородки; 7 — полость резонатора; 8 — отверстия в перегородках

ных форсунок 2 служат для подачи окислителя, а внешние — для подачи горючего. В форсунках, перекрытых перегородками, внутренние каналы заглушены, а через внешние горючее поступает в каналы перегородок и впрыскивается в камеру сгорания через отверстия 8. Если неустойчивое горение возникает только во время запуска, то перегородки могут выполняться из пластмассы и приклеиваться к внутреннему днищу головки и стенке камеры.

Разгораживая пространство камеры сгорания на ряд отдельных участков, перегородки предотвращают возникновение больших пульсаций давления газа, а также поглощают часть энергии колебаний при ударах волн сжатия. Однако применение перегородок, особенно охлаждаемых, усложняет конструкцию головки и ведет к увеличению неравномерности распределения компонентов по сечению камеры, так как при их установке приходится нарушать принятую схему расположения форсунок.

В последнее время используются акустические резонаторы, которые образуются в результате разгораживания кольцевой полости во фланце головки (позиция 7 на рис. 10) радиальными ребрами. Однако резонаторы рассчитаны только на подавление определенных форм колебаний. Они применяются вместе с антипульсационными перегородками или без них.

На конструкцию головки значительное влияние оказывают физические свойства подаваемых компонентов и их фазовое состояние.

Если двигатель работает на высококипящем топливе (например, на N_2O_4 и аэрозине 50), компоненты которого плохо испаряются, то головка должна иметь большое число центробежных форсунок или форсунок со сталкивающимися струями. В таких головках внутреннее днище надежно защищено от действия горячих газов сплошной жидкой пленкой, составленной из конусов распыла форсунок. Поэтому скорость движения компонента во внутренней полости головки может быть невысокой, что позволяет получить в ней достаточно равномерную эпюру давления по радиусу головки.

Криогенные компоненты легко испаряются, поэтому распыл их может быть более грубым. Однако в этом случае затруднено охлаждение внутреннего днища, так как из-за быстрого испарения компонентов перед ним не образуется сплошная жидкостная завеса. Эффективным способом охлаждения внутреннего днища в этом случае является применение для него пористого материала или же сверление в нем дополнительно к основным форсункам большого числа малорасходных защитных форсунок с малой дальностью. Можно также увеличить скорость движения компонента во внутренней полости головки. Но это приводит к значительной неравномерности эпюры давления перед форсунками по радиусу головки, так как увеличивается гидравлическое сопротивление по-

ности, сильно загроможденной форсунками (рис. 11,б). Поэтому приходится применять специальные конструктивные меры по уменьшению этой неравномерности, например, устанавливать перегородку с отверстиями между средним и внутренним днищем и т. п. Неравномерность давления в наружной полости головки, возникающую при центральном подводе компонента (рис. 11, а), можно

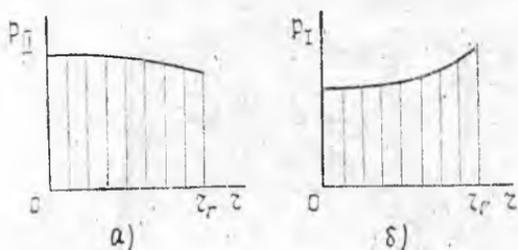


Рис. 11. Изменение давления компонента топлива по радиусу головки в наружной (а) и во внутренней (б) полостях

снизить, установив после входного патрубка распределительную решетку (см. рис. 7).

При использовании в двигателе в качестве окислителя перекиси водорода последняя перед поступлением в камеру предварительно разлагается в реакторе 1 (рис. 12), заполненном катализатором (например, набором сеток из нержавеющей проволоки, покрытой серебром). Получающиеся при этом продукты разложения (парогаз — водяной пар и кислород) через форсунки 3 подаются в камеру сгорания. Сюда же через центральный патрубок, сверления (наклонные и радиальные) и форсунки 4 впрыскивается керосин. Так как температура парогаза достаточно высока, то в камере происходит термическое воспламенение компонентов.

Схема головки с предварительным разложением одного из компонентов топлива применена также в разрабатываемом двухрежимном двигателе (рис. 13). Для создания минимальной тяги (1,5 кН), необходимой для осуществления коррекции траектории полета К/А, в реакторы 3 из распределителя 1 подается гидразин, который в присутствии катализатора (гранулы керамики, покрытые платиной и палладием) разлагается на аммиак и азот. Продукты разложения через внутренние каналы 7 соосных форсунок поступают в камеру, которая в данном случае выполняет только роль сопла. Для уменьшения тепловых потерь корпус в зоне камеры сгорания снаружи имеет тепловую изоляцию 5. Увеличение тяги до максимального значения (4,2 кН) для разгона или торможения К/А обеспечивается подачей через внешние каналы форсунок четырехоксида азота, и в камере происходит горение продуктов раз-

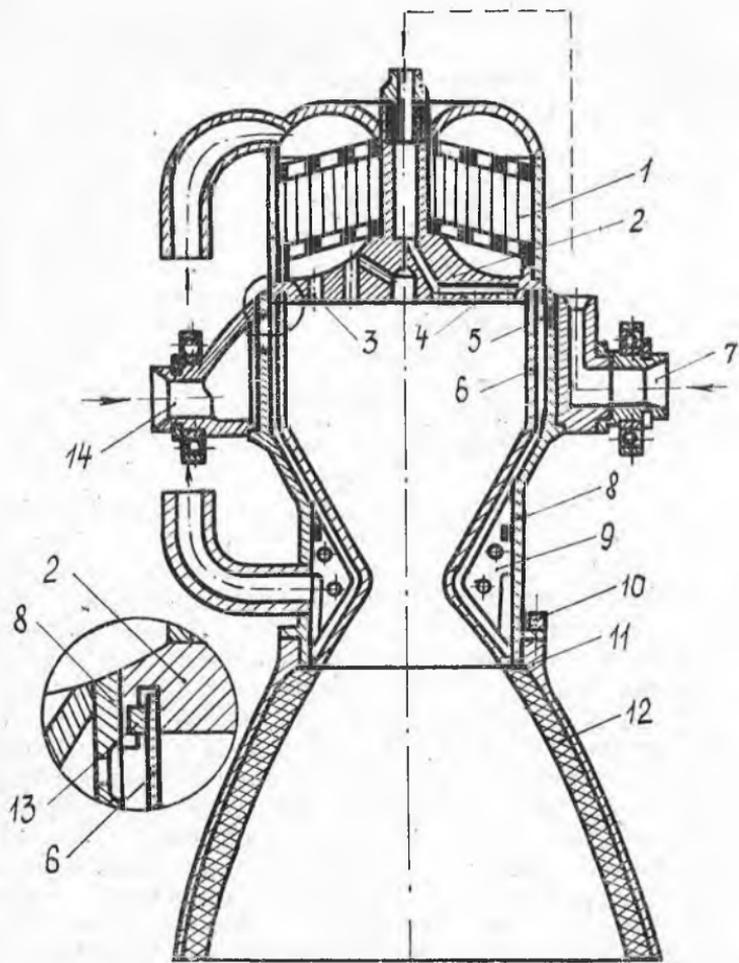


Рис. 12. Камера с предварительным разложением одного из компонентов в наружной полости головки: 1 — катализатор, 2 — форсуночный блок; 3, 4 — форсунки; 5 — входной коллектор тракта охлаждения; 6 — стенка корпуса камеры; 7 — вход горячего; 8 — рубашка корпуса камеры; 9 — вкладыш; 10 — винт; 11, 12 — корпус и аблирующая вставка отъемной части сопла; 13 — уплотнение; 14 — вход окислителя

ложения гидразина. Корпус камеры, изготовленный из тугоплавкого ниобиевого сплава, на этом режиме работы охлаждается излучением и с помощью завесы, образуемой подачей жидкого гидразина внутрь камеры через отверстия *б* специального коллектора *4*, расположенного на периферии головки. На режиме минимальной тяги внешние каналы форсунок и коллектор завесы продуваются инертным газом.

Поскольку один из компонентов подается в камеру в газообразном состоянии, а другой — в жидком, такая головка является газожидкостной. Газожидкостные головки применяются также в двигателях, использующих в качестве горючего водород, который газифицируется уже в тракте охлаждения корпуса камеры и в двигателях с дожиганием генераторного газа. Форсуночный блок в последнем случае может быть сплошным, щелевым или решетчатым.

Если двигатель имеет один турбокомпрессорный агрегат (ТНА) и генераторный газ подводится к головке по одному газоводу, то для обеспечения его безотрывного течения в верхней полости наружное днище обычно делается коническим или расширяющимся торoidalным, а выравнивание поля давления перед форсунками осуществляется с помощью газораспределительной решетки.

При двух отдельных ТНА газ подводится к головке по двум или более газоводам. При этом может быть применена конструкция головки, изображенной на рис. 14. Основным силовым элементом ее является литой корпус головки *4*, на верхнем фланце которого устанавливается карданное крепление камеры к раме. В корпусе с помощью перегородок образованы полость *13* электронского воспламенителя и полость *3* жидкого окислителя (O_2). Форсуночный блок, состоящий из пористых внутреннего *7* и дополнительного *11* днищ, крепится к корпусу головки посредством форсунок. Окислитель подается в камеру через коллектор, полость *3* и форсунки *9*. Генераторный газ после турбин ТНА через газоводы *5* поступает в газосборник *12* камеры, в который вставляется головка, и через форсунки *10* также подается в камеру. При запуске двигателя через трубопроводы *1* в полость воспламенителя

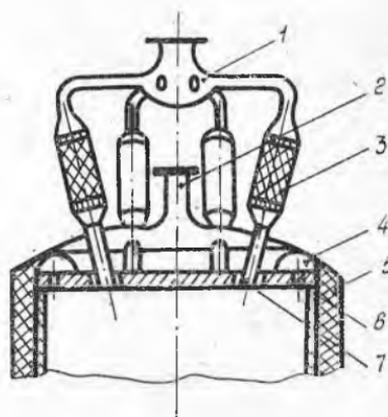


Рис. 13. Схема головки двухрежимного ЖРД: 1 — подвод N_2H_4 ; 2 — подвод N_2O_4 ; 3 — реактор; 4 — коллектор завесного охлаждения; 5 — теплоизоляция камеры сгорания; 6 — отверстия пояса завесы; 7 — форсунка

поступают компоненты топлива, смесь которых зажигается электрискровыми свечами. Так как форсуночный блок сильно нагревается генераторным газом и обратными токами продуктов сгорания топлива, то в полость, образованную днищами 7 и 11, подается из тракта охлаждения газоводов газообразный H_2 , который через поры днищ просачивается в полость генераторного газа и в камеру. Выступающие в огневое пространство форсунки 8 образуют центральную кольцевую и шесть периферийных радиальных антипуль-

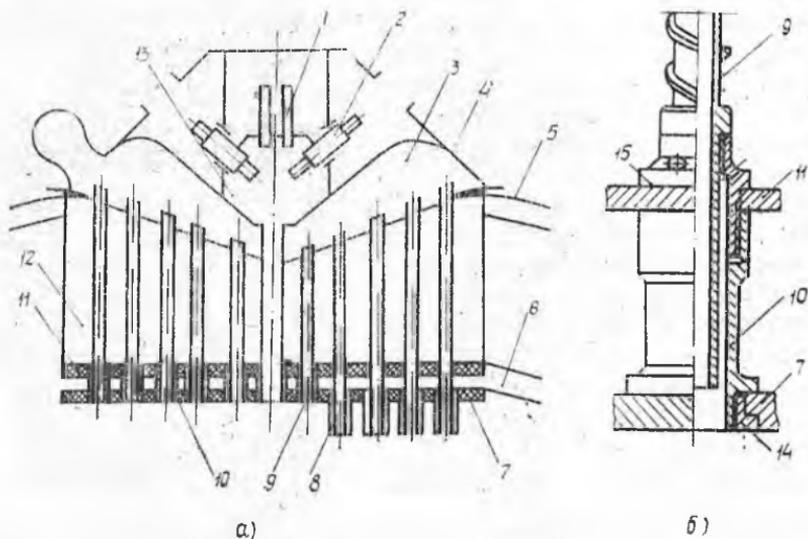
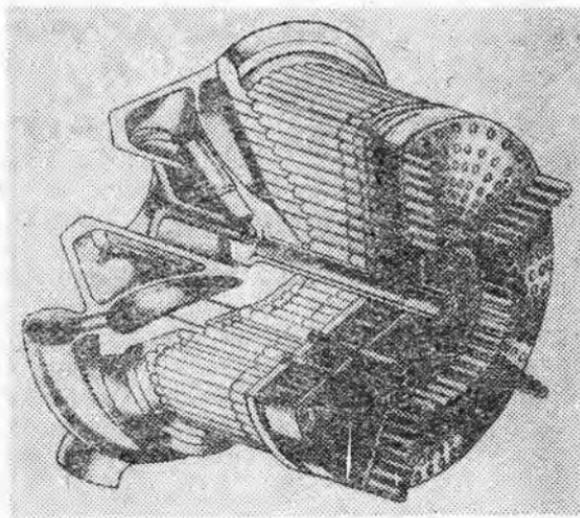


Рис. 14. Схема газожидкостной головки с двумя газоводами (а), ее форсунки (б) и внешний вид (в): 1 — подвод компонентов в камеру воспламенителя; 2 — электрискровые свечи; 3 — полость жидкого окислителя; 4 — корпус головки; 5 — корпус газовода; 6 — стенка газовода; 7 — пористое внутреннее днище; 8, 10 — форсунки генераторного газа; 9 — форсунки окислителя; 11 — дополнительное пористое днище; 12 — газосборник камеры; 13 — воспламенитель; 14, 15 — втулки с резьбой



сационных перегородок. Ряды форсунок окислителя в газовой полости головки играют роль газораспределительной решетки, способствуя повороту генераторного газа в направлении оси головки и выравниванию его давления перед форсунками 10. Форсунки 9 своими верхними концами надеты на пустотелые цилиндрические бобышки, выфрезерованные на нижней поверхности корпуса головки, и приварены к ним. Снаружи на форсунках нарезаны винтовые ребра, обеспечивающие поворот газа. Они заканчиваются кольцевым выступом с резьбой, на которую навинчена втулка 15 с входными отверстиями для генераторного газа, крепящая к форсункам днище 11, а втулка 14 — днище 7. Форсуночный блок головки не опирается на корпус газосборника и может перемещаться в осевом направлении вместе с концами заделанных в нем форсунок для устранения в них температурных напряжений. Торец форсунки окислителя на 5,8 мм выше торца форсунки горючего, что обеспечивает смешение компонентов еще в форсунке для ускорения испарения O_2 .

Компоновочная схема с расположением турбин ТНА в газовой полости головки испытывалась в экспериментальном ЖРД с дожиганием на топливе $H_2 + O_2$ (рис. 15). Для снижения гидравли-

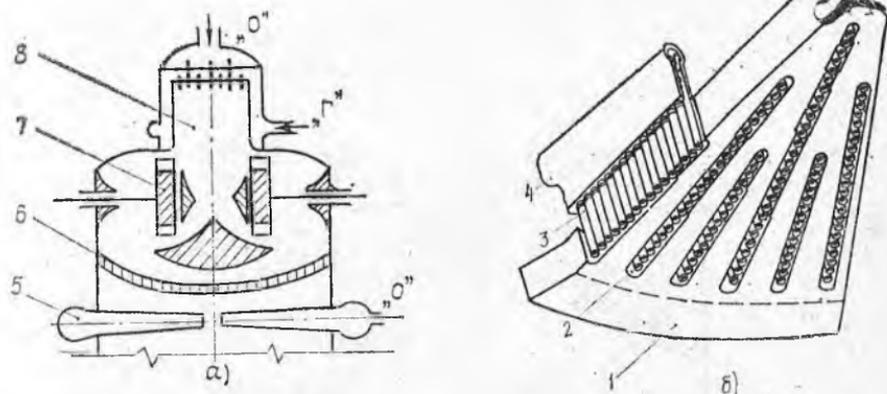


Рис. 15. Схема головки (а) со щелевым форсуночным блоком (б): 1 — внутреннее днище; 2 — щели; 3 — форсунки окислителя; 4, 5 — радиальный и кольцевой коллекторы; 6 — газораспределительная решетка; 7 — турбина; 8 — ЖГГ

ческих потерь по линии генераторного газа был использован щелевой форсуночный блок. Во внутреннем днище 1 были выполнены радиальные прорезы (щели) 2, в которые вставлены гребенки 3 из центробежных форсунок, объединенных радиальными трубчатыми коллекторами 4. Жидкий компонент из кольцевого коллектора, охватывающего головку, поступал в радиальные коллекторы и че-

рез форсунки впрыскивался в камеру. Генераторный газ после турбин поступал в камеру через щели, причем его турбулизация при обтекании радиальных коллекторов форсунок обеспечивала хорошее перемешивание компонентов, а достаточно высокая температура — быстрое испарение окислителя и термическое воспламенение смеси. При необходимости форсунки в некоторых гребенках могут быть удлинены для образования антипульсационных перегородок. Недостатком такой головки является возможность возбуждения колебаний давления газа в камере вследствие влияний пульсаций давления генераторного газа, возникающих при работе турбины. При наличии газоведа эти пульсации в значительной степени сглаживаются.

Дальнейшее увеличение проходного сечения для газообразного компонента можно получить с помощью решетчатого форсуночного блока, составленного из кольцевых и радиальных трубок, предварительно деформированных для придания им обтекаемой формы. В этих трубках сверлится большое число отверстий для подачи жидкости по потоку, против него и в поперечном направлении (рис. 16). Аналогичная конструкция может быть применена и для газозафазных головок.

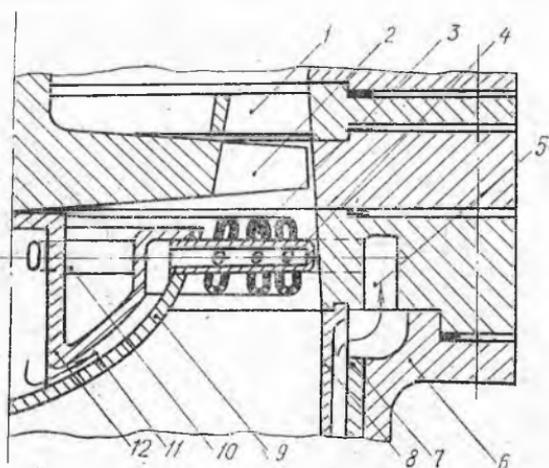


Рис. 16. Схема головки с решетчатым форсуночным блоком и компоновкой турбины ТНА в верхней полости: 1, 2 — сопловой и рабочий лопаточные венцы турбины; 3, 4 — кольцевые и радиальные трубки решетки; 5 — коллектор корпуса головки; 6, 7, 8 — соответственно фланец, рубашка и стенка корпуса камеры; 9 — внутреннее днище; 10 — радиальная трубка для подачи горючего из коллектора корпуса головки в стакан среднего днища; 11 — ребра, соединяющие внутреннее и среднее днища; 12 — среднее днище со стаканом

Проектирование головки. При проектировании головки рекомендуется следующий порядок выполнения работ:

выбрать диаметр головки, тип и форму форсуночного блока;

выбрать тип, схему расположения форсунок на внутреннем днище и их шаг;

вычертить в определенном масштабе внутреннее днище, расположить на нем форсунки и подсчитать их число по соответствующим зонам газа (ядру потока и пристеночному слою) в камере;

рассчитать расход компонентов через форсунки горючего и окислителя в указанных зонах и, задавшись перепадом давления на них, определить сечения каналов, а также выяснить возможность размещения форсунок на днище;

определить потери удельного импульса из-за неравномерного распределения соотношения компонентов по радиусу и окружности головки;

выбрать схему движения компонентов через головку, места их подвода, объемы верхней и нижней полостей;

выбрать схему силовой системы головки, форму отдельных деталей, наиболее целесообразный вариант их соединения между собой, соединение головки с корпусом камеры и произвести предварительную компоновку головки;

выбрать материал для изготовления деталей головки, произвести расчет системы их теплозащиты, расчеты прочности и жесткости;

произвести окончательную компоновку и вычертить сборочный чертеж;

уточнить технологию изготовления деталей, вычертить чертежи деталей и назначить технические требования на изготовление и испытания головки.

Диаметр внутреннего днища принимается равным диаметру камеры сгорания. Выбор типа форсуночного блока зависит от назначения двигателя, свойств компонентов, вида системы подачи топлива и производится на основе анализа преимуществ и недостатков имеющихся конструкций. Только в том случае, если ни одна из них не удовлетворяет предложенным требованиям, приходится разрабатывать новую конструкцию и доводить ее.

Распределение соотношения компонентов и расходонапряженности по радиусу поперечного сечения камеры, заданное смесительными элементами головки, сохраняется почти по всей длине камеры сгорания. Поэтому совершенство процесса в ней и его устойчивость во многом зависят от правильного выбора типа, шага (расстояния между осями) форсунок и схемы их расположения на внутреннем днище головки.

Схема расположения однокомпонентных форсунок на днище может быть шахматной, сотовой и по концентрическим окружностям.

тям. Выбор той или иной схемы обуславливается видом топлива, соотношением компонентов и характером его распределения по поперечному сечению камеры, а также типом форсунок. Например, шахматное расположение (форсунки горючего и окислителя чередуются и число их примерно одинаково) целесообразно использовать в том случае, если объемные расходы компонентов примерно одинаковы. При сотовом расположении на одну форсунку горючего приходится примерно две форсунки окислителя и оно используется чаще, так как расход окислителя обычно значительно больше расхода горючего. Обе указанные схемы применяются обычно при использовании центробежных форсунок. Струйные форсунки чаще всего располагаются по концентрическим окружностям, причем пояса форсунок горючего и окислителя чередуются. По концентрическим окружностям обычно располагаются и двухкомпонентные форсунки, а также периферийные форсунки горючего. С целью создания равномерного пристеночного слоя последние имеют меньший шаг и пониженный расход.

Объем полостей головки определяется, исходя из следующих соображений. При большом объеме полости скорость течения компонента в ней будет малой, что обеспечивает более равномерное поле давлений перед форсунками по радиусу головки. Однако при этом увеличиваются масса головки, импульс последствия тяги и время переходных процессов при регулировании двигателя. Поэтому приходится находить оптимальные объемы полостей, проверяя правильность выбора путем проливок головки и огневых испытаний камеры при ее доводке.

По схемам силовых систем головки отличаются лишь отсутствием или наличием, числом и расположением ребер, соединяющих форсуночный блок с наружным днищем. Ребра устанавливаются обычно в головках, диаметр которых превышает 200 мм. В зависимости от схемы расположения форсунок ребра могут быть кольцевыми, многоугольными или радиальными и привариваются к днищам таким образом, чтобы не мешать входу компонента в форсунки.

При предварительной компоновке головки необходимо на ней разместить воспламенители (если используются несамовоспламеняющиеся компоненты топлива), штуцера для замера давлений перед форсунками и в камере сгорания, узлы крепления камеры к силовой раме. При электронскровом или химическом зажигании воспламенитель обычно располагается в центре головки (см. рис. 14). Пиросвечи могут быть установлены на периферии головки или же на корпусе камеры вблизи головки, как и штуцеры замера давления газов.

Выбор материала для изготовления деталей головки определяется условиями работы последних. Так, например, все детали, со-

прикасающиеся с химическими активными компонентами, должны изготавливаться из материалов с высокой коррозионной стойкостью (алюминиевых сплавов или нержавеющей стали). При использовании криогенных компонентов выбираются высоколегированные стали и цветные сплавы, сохраняющие пластичность при низких температурах, а для внутреннего днища — материалы с высокой теплопроводностью, например, бронзы. Литые головки чаще всего изготавливаются из алюминиевых сплавов.

После расчета системы теплозащиты внутреннего днища и расчетов прочности силовых деталей головка комплектуется окончательно.

На чертежах деталей и сборочном чертеже головки должны быть указаны технические требования, гарантирующие:

совпадение оси суммарного факела распыла головки с осью камеры сгорания, что обеспечивается жесткими допусками на параллельность осей форсунок оси головки (не более $\pm 15''$), на биеение торцев свариваемых деталей — кромки внутреннего днища и стенки корпуса камеры относительно соответствующих осей ($\sim 0,1$ мм);

заданное соотношение компонентов по сечению камеры и равномерную расходонапряженность, для чего ограничиваются погрешности шага форсунки (допуск $\pm 0,2$ мм);

заданную величину расхода через головку, что обеспечивается подбором форсунок с соответствующим расходом;

прочность элементов головки и герметичность ее полостей, для чего выбирается вид сварки, категория швов, методы их выполнения и проверки качества.

Форсуночный блок, а затем и вся головка подвергаются технологическим испытаниям, чтобы установить соответствие параметров головки заданным требованиям. Эти испытания заключаются в гидро- и пневмопрессовках полостей и в проливке каналов головки.

Проверить прочность деталей при огневых испытаниях практически невозможно, и ее производят путем гидроопрессовки полостей. Гидроопрессовка заключается в том, что в полость, выходы из которой заглушены, под определенным давлением подается вода с добавлением (0,3—0,5% по весу) хромпика $K_2Cr_2O_4$ для предотвращения коррозии металлов. Затем, после слива жидкости, конструкция осматривается с целью обнаружения трещин, выпучивания при отрыве по саям и т. п. Использование жидкости при проверке прочности обуславливается требованиями техники безопасности: при появлении трещины давление жидкости в полости мгновенно падает и разрушения конструкции не происходит, тогда как газ, расширяясь, произвел бы разрушения, аналогичные взрыву. Давление гидроопрессовки должно быть во столько раз выше (ниже)

рабочего давления в полости, во сколько раз предельные напряжения материала деталей или соединений при нормальной температуре будут соответственно выше (ниже) этих напряжений при рабочей температуре.

При опрессовке сборочной единицы производится проверка прочности нескольких деталей и их соединений. Поэтому за давление гидроопрессовки принимается минимальное давление, которое определяется по условиям работы наиболее слабого элемента конструкции. Для проверки запаса прочности производится опрессовка, при которой давление повышается до тех пор, пока конструкция не разрушится. Такой опрессовке подвергается обычно одна головка от изготовленной партии.

При проверке герметичности полостей используется газ с давлением, гораздо меньшим рабочего. Объясняется это как требованием техники безопасности, так и тем соображением, что вязкость газа значительно меньше вязкости жидкости. Однако для полостей, по которым движется газообразный компонент, желательно проверить герметичность при давлении, равном или выше рабочего. Методы определения негерметичности приводятся в специальной литературе.

Затем головка поступает на проливку, где на специальном стенде проверяются расход компонентов при заданном давлении и равномерность расходонапряженности по радиусу и окружности головки. В качестве проливочной жидкости используется вода с последующим пересчетом расхода на компоненты.

Головка является наиболее сложным и ответственным узлом камеры двигателя и на ее доводку затрачивается значительное время. Дефекты, которые наиболее часто появляются во время доводки вследствие неудачной конструкции головки, заключаются в перегреве и, вследствие этого, сильной эрозии стенок корпуса камеры, огневого днища и торцев форсунок, в пониженном удельном импульсе камеры и в появлении неустойчивого горения топлива. Некоторые меры по устранению этих дефектов рассмотрены ранее. Доводка головки считается законченной, когда ее параметры будут соответствовать величинам, указанным в технических условиях.

Контрольные вопросы

1. Требования, предъявляемые к головкам и форсункам?
2. Классификация головок и форсунок?
3. Преимущества отдельных типов головок и форсунок и области их рационального применения?
4. Как влияет вид применяемого топлива на конструкцию головок?

5. Каковы конструктивные мероприятия по повышению устойчивости горения топлива в камере?

6. Каков порядок проектирования головки?

7. Способы изготовления деталей, порядок сборки и методы испытания головки?

8. Какие материалы применяются для изготовления деталей головки?

9. Какие технические условия назначаются на изготовление и испытання головки?

Составитель *Пичугин Дмитрий Федорович*

КОНСТРУКЦИЯ ГОЛОВКИ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Методические указания к лабораторной работе № 2

Редактор М. И. Логунова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 27.12.82 г. Подписано в печать 21.01.83 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Высокая печать. Гарнитура Л1-10. Усл. п. л. 1.63.
Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 450 экз. Заказ № 3.
Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ. КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.

КОНСТРУКЦИЯ КОРПУСА КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы — изучение конструкции корпусов камер.

Домашнее задание

1. Изучить материал данного указания.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Аудиторное задание

1. Изучить конструкцию корпусов камер заданных двигателей и зарисовать их конструктивные схемы с делением на основные сборочные единицы.
2. Выбрать и обосновать выбор типа корпуса камеры проектируемого двигателя, зарисовать его конструктивную схему с делением на сборочные единицы.
3. Сделать эскиз сборочной единицы корпуса «Средняя часть камеры».
4. Записать марки материала, способы изготовления и соединения деталей в этой сборочной единице.
5. Записать порядок сборки сборочной единицы, виды ее «ходных» испытаний и ТУ на сборку и испытания.

КОРПУСА КАМЕР

Корпус формирует газовый тракт камеры и его стенка находится под воздействием газа, имеющего высокие давление, температуру и скорость. Корпуса камер различаются формой камеры сгорания и сопла, способом теплозащиты стенки, схемой силовой системы и технологией изготовления.

Форма камеры сгорания может быть сферической, конической, цилиндрической и кольцевой. Широко используются цилиндрические или имеющие небольшое сужение в сторону сопла камеры сгорания, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с камерами сгорания другой формы. С цилиндрическими камера-

ми сгорания обычно используются профилированные сопла Лаваля. Кольцевые камеры сгорания и сопла пока еще не получили применения вследствие сложности изготовления и трудности обеспечения надежной теплозащиты стенок. В последнее время для многокамерных двигателей с штыревым соплом разрабатываются камеры сгорания овального или прямоугольного сечения.

По схеме силовой системы корпуса делятся на одностенные, двухстенные (с независимо работающими и со связанными стенками) и комбинированные.

Технология изготовления корпусов достаточно разнообразна и рассматривается при анализе соответствующей конструкции.

1. Конструкция корпусов камер

Конструкция корпуса определяется схемой его силовой системы и способом теплозащиты стенки.

Наиболее просты по конструкции одностенные корпуса, защита которых от перегрева осуществляется с помощью аккумуляции тепла материалом самой стенки, излучения его в окружающее пространство, применения аблирующих покрытий или создания низкотемпературного пристеночного слоя газа. При этом корпус может быть выполнен из металла или стеклопластика.

Одностенный металлический корпус (см. рис. 6 [1]) сварен из листовой нержавеющей стали, покрыт внутри теплоизолирующим покрытием (двуокисью циркония ZrO_2) и имеет в зоне критического сечения графитовый вкладыш. Основная теплозащита стенки корпуса обеспечивается завесным охлаждением. Для этого на внутреннюю поверхность стенки из коллектора форсуночного блока через отверстия подается горючее, которое образует после испарения низкотемпературный пристеночный слой газов. При расходе горючего через завесу, составляющем 11% от расхода топлива через головку, температура стенок не превышает 1370К. Широкое применение одностенные металлические корпуса нашли в ЖРДМТ и в сопловых насадках больших камер. В этом случае они изготавливаются из тугоплавких металлов (ниобия, молибдена) и охлаждаются излучением.

При теплозащите стенки корпуса абляцией в нее помещается вставка из аблирующего материала. Вставка изготавливается путем намотки стекловолокна на разъемную оправку, внешняя поверхность которой точно соответствует форме и размерам газового тракта камеры. Одновременно с намоткой производится пропитка слоев связующим веществом (синтетическими смолами). Зазор между вставкой и корпусом заливается затвердевающим теплоизоляционным материалом. Иногда металлический кожух 1 имеет только камера сгорания, а сопло 2 выполнено из стеклопластика,

причем на его срезе устанавливается металлическое кольцо жесткости $З$ (рис. 1). Корпус может быть и целиком сделан из пластмассы, а металлические фланцы для крепления головки и кольцо жесткости на срезе сопла заделываются в него при изготовлении.

Эффективность указанных выше способов теплозащиты одностенного корпуса при приемлемых потерях I_y весьма невелика. Поэтому такие конструкции целесообразно использовать лишь при малой величине тепловых потоков в стенку (при $p_k < 1,0$ МПа или $T_{oc} < 2500K$) или же в двигателях с малым временем работы. В этих условиях одностенные корпуса по сравнению с двухстенными имеют меньшую массу, проще в изготовлении и более надежны, особенно в условиях длительных полетов в космическом пространстве.

Корпуса камер ЖРД, работающих при высоких значениях p_k и T_{oc} , имеют проточное охлаждение. Для формирования тракта охлаждения¹ корпус выполняется двухстенным. Внутреннюю стенку обычно называют стенкой, а наружную — рубашкой.

Двухстенные корпуса отличаются друг от друга типом связей между стенками и технологией изготовления. У корпусов с независимо работающими стенками последние соединяются между собой лишь у головки и среза сопла. Стенки при работе нагреваются неодинаково, вследствие чего возникает разница в их температурных расширениях. Для компенсации этой разницы одно из соединений стенок в осевом направлении делается податливым. Так, в корпусе камеры (см. рис. 12 [1]) стенка 6 и рубашка 8 около среза охлаждаемой части сопла сварены, а стенка около головки может перемещаться относительно рубашки в кольцевом пазу внутреннего днища 2. Для обеспечения герметичности этого соединения поставлено сальниковое уплотнение 13. Для сохранения по-

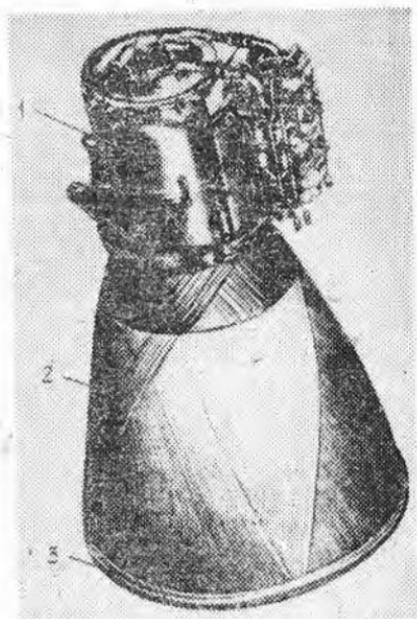


Рис. 1. Камера со стеклопластиковым корпусом

¹ Трактом охлаждения называется совокупность каналов в корпусе и смешительной головке камеры, служащих для протекания охладителя. Он начинается у подводящего коллектора и кончается выходом из форсунок.

стояннoй величины зазора в тракте охлаждения корпуса на наружной поверхности стенки выполнены фрезерованием продольные пазы, по которым и течет охлаждающая жидкость (окислитель). Для обеспечения сборки корпуса зазор между стенкой и рубашкой в зоне критического сечения сопла формируется с помощью разъемного вкладыша 9. К фланцу рубашки, расположенному у среза охлаждаемой части сопла, крепятся винтами 9 насадок, состоящий из металлического корпуса 11 и аблирующей вставки 12.

В другой конструкции (см. рис. 4 [1]) к наружной поверхности стенки по образующей приварены отрезки 12 квадратной проволоки, а компенсация разности осевых удлинений стенок между поясами завес 13 осуществляется с помощью гофровых компенсаторов 10.

Корпуса с независимо работающими стенками применялись лишь на первых этапах развития ЖРД, когда параметры газа в камере были невысоки. Основным недостатком таких корпусов является большая масса, так как по условиям сохранения устойчивости и прочности толщину стенки и рубашки приходилось делать большой (до 4—5 мм), а это приводило, в свою очередь, к ухудшению условий проточного охлаждения. Поэтому в настоящее время такие конструкции используются весьма редко.

В подавляющем же большинстве камер стенки корпусов связаны между собой посредством дополнительных элементов—связей. Эти связи расположены настолько часто, что давление охладителя p_0 не вызывает значительных прогибов стенок между ними. Вместе с тем давление газа в камере воспринимается совместно стенкой и рубашкой, что позволяет делать их более тонкими. Стенки могут быть соединены сваркой (сварные корпуса) или пайкой (паяно-сварные корпуса).

В сварных корпусах (рис. 2) стенки изготавливаются из листового материала гибкой на гибочно-вальцовочных машинах с последующей сваркой кромок продольным швом. Затем на рубашке делаются углубления (выштамповки) или канавки (выдавki), по доньшкам которых и производится ее сварка со стенкой. Выштамповки имеют круглую или овальную форму и располагаются обычно в шахматном порядке. Шаг и диаметр выштамповок определяется условиями обеспечения местной прочности стенки между связями и прочности сварного шва точечной связи. Требуемый зазор между стенкой и рубашкой обеспечивается глубиной выштамповок. Поскольку сопла таких камер имеют малую степень расширения ($F = 4—6$), то коллектор для подвода охладителя обычно располагается у среза сопла. Вначале изготавливаются отдельно сборочные единицы корпуса: камера сгорания, сужающаяся и расширяющаяся части сопла. Затем они соединяются сваркой: стенки

свариваются встык, а рубашки — с помощью разъемных соединительных колец.

Существенными недостатками сварных корпусов являются значительная поверхность стенки, охладимая сваркой, и, следовательно, охлаждаемая косвенно, с помощью теплопроводности, а также

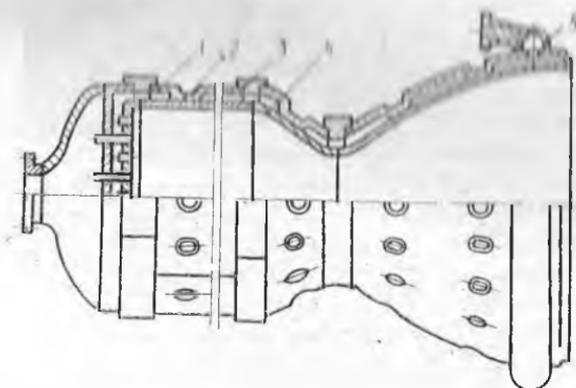


Рис. 2. Схема двухстенной камеры со сварным корпусом и связями в виде выштамповок: 1—рубашка; 2—выштамповки; 3—разрезное соединительное кольцо; 4—стенка; 5—коллектор

большое гидравлическое сопротивление тракта охлаждения, загроможденного выштамповками. Кроме того, для получения качественной сварки необходимо, чтобы стенка и рубашка имели примерно равную толщину и были изготовлены из одинаковых материалов (например, сталей), в то время как для лучшего охлаждения стенка должна иметь малую толщину или изготавливаться из материалов с высокой теплопроводностью. Поэтому сварные корпуса довольно быстро уступили место паяно-сварным конструкциям.

В паяно-сварных конструкциях используются частые линейные (продольные или винтовые) элементы — связи, представляющие собой стенки профилированных трубок (рис. 3, а), ребра, полученные фрезерованием пазов с наружной стороны стенки (рис. 3, б),

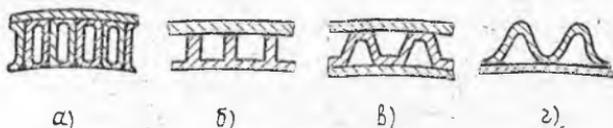


Рис. 3. Элементы паяных двухстенных корпусов: трубчатых (а), с ребрением (б) и гофрированными проставками (в, г)

тонкостенные гофровые проставки, вставленные между рубашкой и стенкой (рис. 3, в), или припаянные только к стенке (рис. 3, г). Соединение элементов корпуса производится пайкой и сваркой.

Небольшое расстояние между связями, подкрепляющими стенку, позволяет сделать ее тонкой, а также повысить температуру поверхности стенки, соприкасающейся с жидким охладителем, поскольку в узких каналах охлаждающего тракта лучше реализуется режим охлаждения при пузырьковом кипении. Кроме того, при правильно выбранных размерах ребер увеличение площади охлаждаемой поверхности ребренной стенки улучшает, по сравнению с гладкой поверхностью, теплоотвод в охладитель. Соединение элементов корпуса пайкой позволяет использовать для стенки высокопроводные материалы, а для рубашки — легированные стали или титановые сплавы, обладающие высокой удельной прочностью. В паяно-сварных корпусах стенка и рубашка совместно воспринимают давление газов в камере, а нагрузка на связи вследствие их большого числа обычно невелика. Поэтому силовая система с частыми линейными связями позволяет получить при малой массе очень прочную, жесткую и достаточно технологичную конструкцию корпуса.

При не очень высоком давлении газа в камере широко используются трубчатые корпуса, составленные из профилированных трубок, которые имеют переменное по длине проходное сечение и общую изогнутость соответственно форме газового тракта камеры (рис. 4). Диаметры исходных трубок колеблются от 3 до 15 мм. Трубки обычно направлены вдоль образующей тракта или, реже, по винтовой линии, охватывающей газовый тракт. Материалом для изготовления трубок служат никель и нержавеющие стали.

Технология изготовления трубчатого корпуса заключается в следующем. Посредством гидравлического формования в несколько переходов круглой трубке придают прямоугольное сечение (см. рис. 3, а) и соответствующий изгиб по длине. При формовке периметр сечения трубки остается постоянным или иногда увеличивается путем ее раздутия. Затем боковые поверхности трубок покрываются припоем и они набираются на разъемную оправку, имеющую форму внутренней поверхности корпуса. При этом трубки подгоняются друг к другу таким образом, чтобы зазор между ними после обжатия технологическими кольцами или усиливающими бандажами обеспечивал получение надежных паяных швов. Подготовленная к пайке сборочная единица помещается в контейнер, в котором создается защитная среда (вакуум, водород), не позволяющая окисляться паяным швам. Контейнер помещается в печь, где нагревается до температуры плавления припоя и выдерживается в течение определенного времени. После пайки контейнер охлаждается вместе с печью для устранения остаточных напряжений

в материале трубок и в паяных швах. Извлеченный из контейнера и освобожденный от оправки корпус подвергается гидро- и пневмоопрессовке, а также проливке тракта охлаждения. Затем к нему привариваются (если не были припаяны) коллекторы и бандажы, а к последним — узлы крепления агрегатов к камере и камеры —

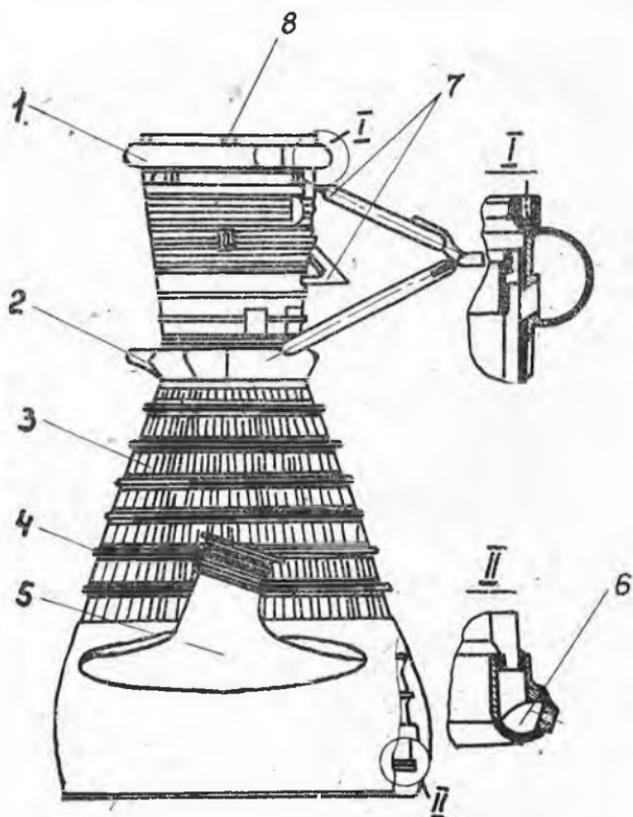


Рис. 4. Трубчатый корпус камеры: 1 — входной коллектор тракта охлаждения; 2 — силовое кольцо кронштейна крепления штока гидроцилиндра; 3 — трубки; 4 — бандажы; 5 — патрубок ввода газа после турбины; 6 — поворотный коллектор; 7 — кронштейны крепления ТНА; 8 — фланец крепления головки

к летательному аппарату. Бандажы представляют собой металлические кольца и служат для увеличения прочности и жесткости корпуса. В зоне камеры сгорания, где давление газов достаточно высокое, они располагаются часто, иногда образуя сплошную обечайку, а на расширяющейся части сопла — значительно реже.

Кольца в зоне критического сечения корпуса делаются разъемными. Иногда вместо колец используется обмотка корпуса проволокой или металлической лентой, которые припаиваются к трубкам.

Ширина трубок по длине корпуса будет переменной, уменьшаясь к критическому сечению и затем вновь возрастая к срезу сопла. При достаточно большом радиусе сечения корпуса ширина трубок становится настолько большой, что участок, формирующий стенку, может прогнуться под действием перепада давления $\Delta p = p_0 - p_2$. Поэтому для корпусов камер с соплами большого уширения ($\bar{F} > 6 - 8$) приходится применять более сложную профилировку трубок или делать их «разводку», т. е. заменять одну трубку двумя или тремя с меньшим диаметром.

В первом случае в определенном сечении закритической части сопла между трубками, идущими от начала корпуса до среза сопла, вставляются короткие профилированные трубки. При этом длинные трубки имеют более сложную профилировку со вторым сужением в месте, где вставляются короткие трубки (рис. 5). Концы *б* коротких трубок *4* отогнуты вверх и через них из коллек-

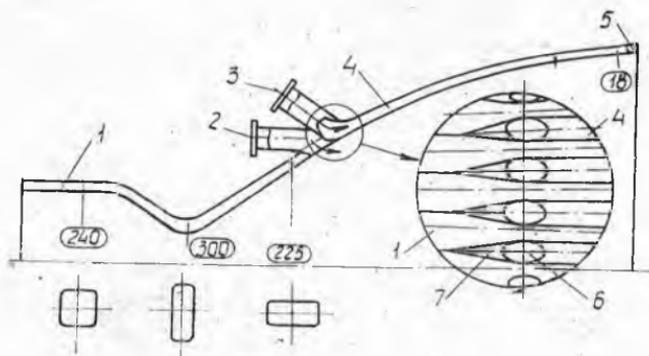


Рис. 5. Корпус камеры с двойной профилировкой трубок: 1 — длинная трубка; 2 — коллектор подвода в сопло газа из турбины; 3 — коллектор подвода охладителя; 4, 6 — короткая трубка и ее отогнутый конец, 5 — поворотный коллектор; 7 — треугольное отверстие. Цифрами обозначена скорость движения охладителя (водорода) в соответствующих сечениях тракта охлаждения; внизу показана форма сечений трубок

тора 3 подается охладитель, который вначале течет к срезу сопла, поворачивается в коллекторе 5 и по трубкам 1 подается в головку. Если треугольные отверстия 7 не запаивать, то через них из коллектора 2 можно внутрь сопла подавать газ после турбины, который создает пристеночный слой.

Во втором случае в сечении, где ширина профилированной

трубки становится предельной, в нее вставляются две или три трубки меньшего диаметра, которые и образуют остальную часть сопла.

Неразъемное соединение головки с корпусом осуществляется с помощью колец, припаяваемых к трубкам в начале камеры сгорания, а разъемное — установкой в этом месте фланца, имеющего гнездо для посадки головки и для ее крепления (см. рис. 4, место I). На срезе сопла концы трубок заделываются в поворотный коллектор (место II), который имеет бобышку с отверстием для слива жидкости.

Основным преимуществом камер с трубчатыми корпусами является их малая удельная масса. Однако уже при $p_k > 6,0$ МПа для обеспечения герметичности и прочности корпуса вместо отдельных бандажей приходится применять сплошную рубашку, что приводит к увеличению массы и усложняет технологию изготовления. Поэтому при больших давлениях в камере целесообразнее применять корпуса со сплошными стенками, связанными частыми продольными или винтовыми связями в виде ребер или гофров.

По одному из вариантов технологии изготовления таких корпусов (рис. 6) заготовка стенки, полученная центробежным литьем

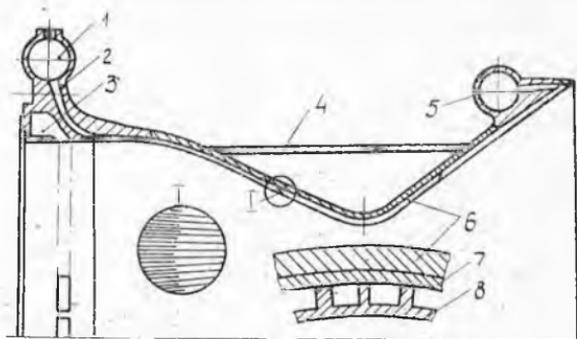


Рис. 6. Схема корпуса камеры с фрезерованной стенкой: 1 — коллектор отвода охладителя; 2 — фланец крепления газосборника камеры; 3 — акустическая полость; 4 — силовой кожух; 5 — коллектор подвода охладителя; 6, 7 — рубашка (стальной и никелевый слой соответственно); 8 — стенка корпуса

циркониевой бронзы¹, для упрочения проковывается. После обточки заготовки и получения заданных профиля и толщины стенки на ее внешней поверхности фрезеруются канавки с минимальной шириной 1,02 мм в критическом сечении сопла. При этом толщина образующихся ребер (1,3 мм) выдерживается постоянной, а ширина

¹ Сплав меди с 3% серебра и 0,5% циркония.

канавок будет изменяться по длине корпуса пропорционально изменению диаметра его внутреннего сечения. В том месте, где она достигает предельного значения (по условию обеспечения местной прочности стенки), число канавок удваивается. Толщина стенки по длине оболочки выдерживается постоянной (0,71 мм) или, если это необходимо по условиям обеспечения надежного охлаждения, может быть сделана переменной. Высота ребер в критическом сечении равна 2,5 мм и изменяется в других сечениях корпуса в зависимости от требуемых размеров проходного сечения каналов тракта охлаждения. После фрезерования канавки стенки заполняются токопроводящим легкоплавким составом, методом осаждения наносится слой меди толщиной 0,05 мм и слой никеля толщиной 1,3 мм, в результате чего образуется гильза с трактом охлаждения. Медный слой предохраняет слой никеля от насыщения водородом¹, циркулирующим в тракте охлаждения. После выплавления легкоплавного состава на полученную гильзу сверху одевается рубашка, состоящая из двух половин, которые затем свариваются электронным лучом. Рубашка изготавливается из высокопрочного стального сплава ковкой и механической обработкой и служит для обеспечения необходимой прочности корпуса, работающего при большом внутреннем давлении ($p_k = 20,5$ МПа). Затем к корпусу для крепления головки и расширяющейся части сопла электронно-лучевой сваркой присоединяются фланцы, входной и выходной коллекторы и силовой кольцевой кожух из двух половин, увеличивающий изгибную жесткость корпуса в зоне критического сечения.

Другой вариант технологии изготовления корпуса предусматривает соединение фрезерованной стенки и рубашки с помощью пайки, так как пайка обеспечивает более прочное соединение, чем электролитическое осаждение.

Механическая обработка поверхностей стенки позволяет получить заданный профиль, обеспечить хорошее прилегание ребер к рубашке, заданные размеры проходных сечений охлаждающего тракта. Кроме того, по сравнению со сварным корпусом, улучшаются условия работы соединения сужающейся и расширяющейся частей сопла, так как оно смещается в сторону от критического сечения, т. е. в зоны, где величина тепловых потоков от газа в стенку гораздо меньше, чем в критическом сечении.

Оребренные стенки используются чаще всего на наиболее теплонапряженных участках корпуса (до $\bar{F} = 5-6$). Остальная часть корпуса может выполняться трубчатой или со связями в виде гофров. Например, съемная расширяющаяся часть сопла (рис. 7) корпуса камеры, показанного на рис. 6, изготовлена из 1086 трубок 6, спаянных вместе с бандажами 7. Охладитель (H) поступает

¹ Наводораживание приводит к охрупчиванию никеля.

в половину трубки через фланец 3 и коллектор 4, движется по ним вниз, поворачивается в коллекторе на срезе сопла и, поднимаясь вверх по соседним трубкам в коллектор 5, отводится затем через трубопровод 1 в газогенераторы двигателя. Клапан 2 служит для перепуска части потока H_2 при работе двигателя на номинальном и форсированном режимах мимо тракта охлаждения.

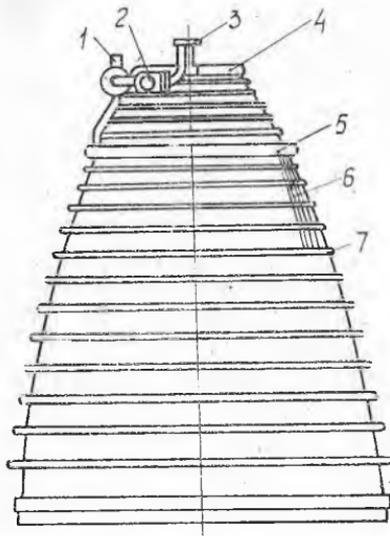


Рис. 7. Трубчатая расширяющаяся часть сопла корпуса камеры, изображенного на рис. 6

В последнее время, особенно для сопел большого расширения, применяются комбинированные корпуса, в которых двухстенная конструкция используется лишь на участках камеры, где величина плотности теплового потока q в стенку достаточно высока. Такими участками являются камера сгорания и сопло до сечения в расширяющейся части, соответствующего $\bar{F} = 15-20^1$. На остальном участке сопла используется одностенная конструкция, которую называют сепловым насадком. Насадок представляет собой тонкостенную профилированную оболочку, изготовленную из тугоплавких сплавов ниобия или молибдена и охлаждаемую излучением. Для повышения жесткости насадка и крепления его к двухстенной

На участке сопла, где давление газа невелико, прочность корпуса может обеспечить одна стенка, а каналы тракта охлаждения формируются наружными гофрами, припаянными к ней снаружи (см. рис. 3,г).

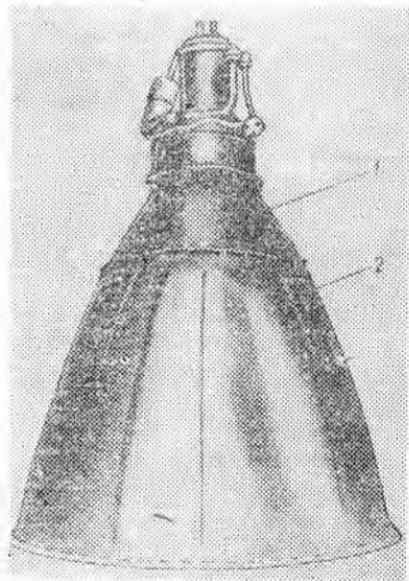


Рис. 8. Камера с неподвижным сопловым насадком: 1 — ниобиевая секция; 2 — титановая секция

¹ В камерах с высоким p_k — до $\bar{F} = 70-80$.

части корпуса с одной стороны к нему приваривается фланец, а с другой — точеное кольцо. В камере, показанной на рис. 8, участок насадка от $\bar{F} = 6$ до $\bar{F} = 40$ выполнен из ниобиевого сплава, причем толщина его меняется от 0,76 мм в начале до 0,56 мм в конце. Для предотвращения окисления материала насадка на него нанесено кремниевое покрытие. От сечения с $\bar{F} = 40$ до сечения с $\bar{F} = 62,5$ участок насадка изготовлен из листового титанового сплава сваркой и усилен по концам кольцами жесткости. На внешнюю поверхность титанового участка нанесено покрытие, повышающее излучательную способность. Теплозащита места присоединения насадка к двухстенному корпусу может осуществляться пленочной завесой.

Применение одностенных сопловых насадков позволяет уменьшить массу камеры, упростить технологию изготовления и, если он сделан съёмным, проводить огневые испытания двигателей на стендах, не имеющих специальных устройств для имитации условий полета на больших высотах.

Для уменьшения длины корпуса ступени ракет предложены раздвижные сопла. На рис. 9 изображена камера с насадком, который выдвигается на определенной высоте полета в исходное положение с помощью ходовых винтов, что увеличивает степень расширения сопла от 70 до 190. Насадок имеет трубчатую конструкцию и охлаждается водородом, который истекает через микросопла, вваренные в каждую трубку на срезе основного сопла. Другая конструкция выдвигаемого насадка, увеличивающего степень расширения сопла от 87,5 до 150, изготовлена из волокнистого

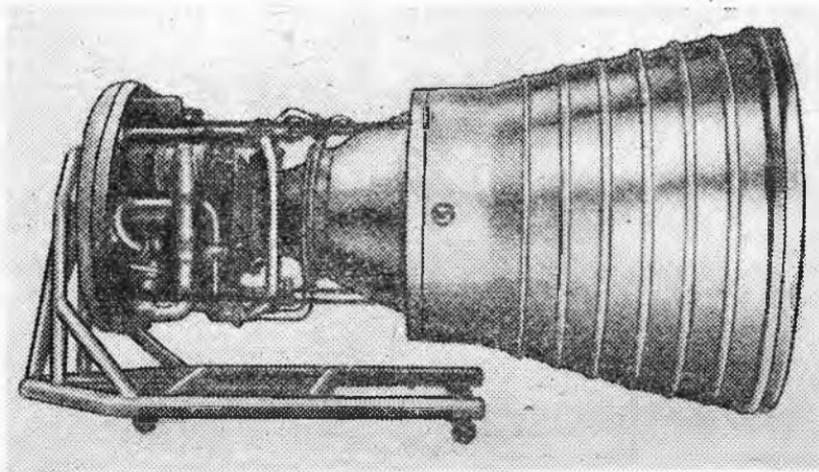


Рис. 9. Камера с выдвигаемым сопловым насадком

графита, способного выдерживать температуру до 3000К и охлаждаемого излучением.

На рис. 10 показана конструкция насадки, автоматически выдвигающегося при запуске. Насадок 3, изготовленный из тонкого

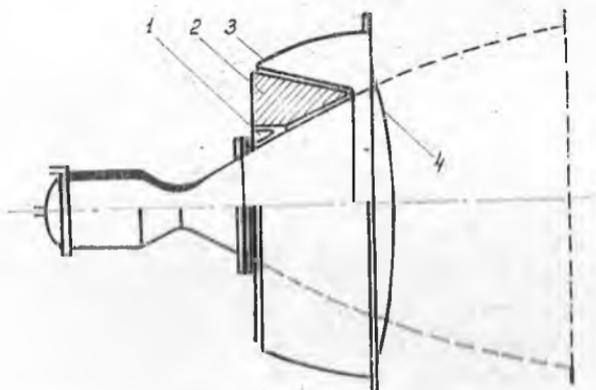


Рис. 10. Камера с автоматически выдвигающимся сопловым насадком

($h = 0,4—0,5$ мм) листа нержавеющей стали или ниобиевого сплава, до запуска находится в сложенном положении. Разрезной вкладыш 2, изготовленный из сотового алюминия, придает насадку жесткость в этом положении и служит направляющей поверхностью при раскрытии последнего. В начальный момент запуска давление газа на мембрану 4 переводит насадок в рабочее положение, обозначенное пунктиром. При этом степень расширения сопла увеличивается с 25 до 75, а длина сопла — более чем вдвое. После достижения в камере определенного давления мембрана разрушается, а вкладыш 2 под действием пружины 1 отбрасывается.

Раскрывающийся сопловый насадок (рис. 11) изготавливается из

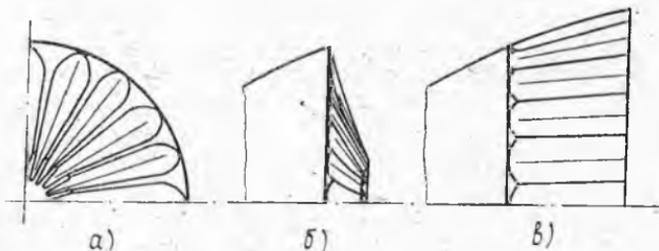


Рис. 11. Раскрывающийся сопловый насадок: сложенный (а), в начале (б) и в конце (в) раскрытия

листа ниобиевого сплава толщиной 0,175 мм. Он крепится к неподвижной части сопла с помощью фланца, имеет 24 складки и укладывается к центру сопла. При раскрытии F увеличивается с 45 до 70, а I_y повышается на 57 м/с. При использовании завесного охлаждения температура его стенки не превышает 1500К.

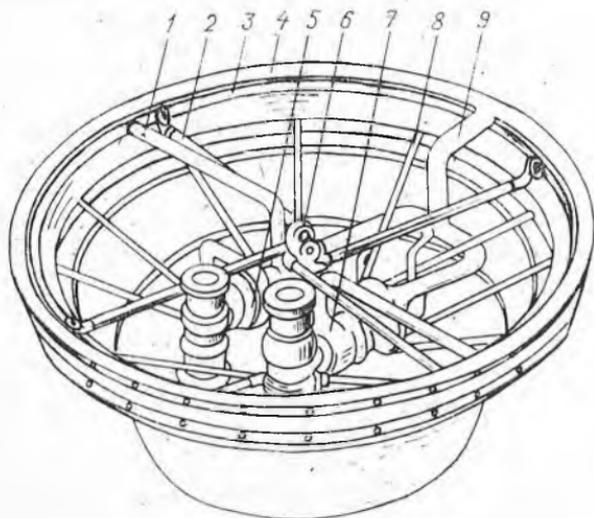


Рис. 12. Двигатель с блочной камерой сгорания и круглым штыревым соплом: 1, 9 — трубопроводы подвода O_2 и H_2 к камерам; 2, 8 — стержни рамы двигателя; 3, 4 — коллекторы O_2 и H_2 ; 5, 7 — ТНА O_2 и H_2 ; 6 — шарнир крепления двигателя

Наряду с камерами круглой формы, ведутся разработки двигателей с блочными камерами, в которых отдельные блоки камеры компонуются с круглым (рис. 12) или плоским (рис. 13) штыревым соплом. Блок камеры таких двигателей имеет прямоугольное поперечное сечение и такой же формы головку с большим числом соосных струйных форсунок (рис. 14). Внутренняя полость блока является камерой сгорания, сужающейся и небольшим участком расширяющейся частями сопла. Стенка корпуса 2 отливается из сплава меди, циркония и серебра вместе с ребрами, которые с припаянными частями рубашки 1 и 3 образуют каналы тракта охлаждения. Такая технология позволяет получить точные размеры каналов и упрощает процесс изготовления блока. Охлаждение стенки блока осуществляется обоими компонентами топлива: водород охлаждает стенку непосредственно, протекая по ее каналам, а кислород — косвенно, протекая по трубкам 3, припаянным к ребрам стенки со стороны оси двигателя, и воспринимая при этом часть тепла от ребер и от водорода (рис. 15). Использование для

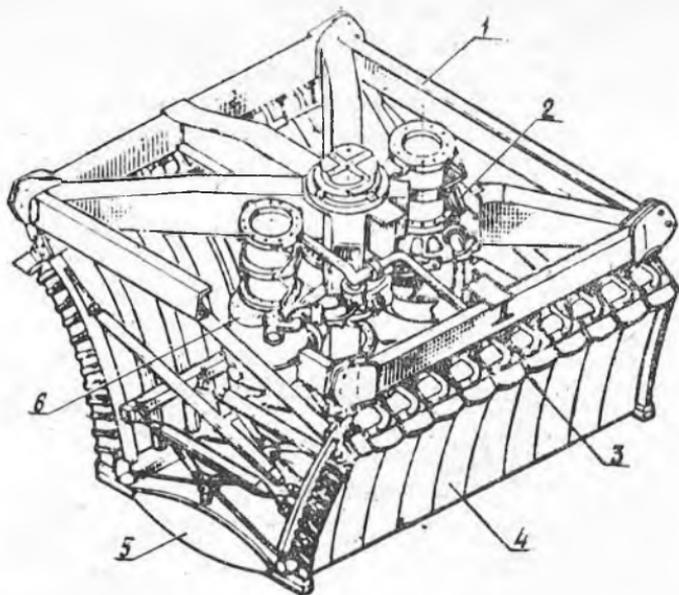


Рис. 13. Двигатель с блочной камерой и плоским штыревым соплом: 1 — рама; 2 — ТНА горючего; 3 — камеры; 4 — стенка сопла; 5 — донный экран; 6 — ТНА окислителя

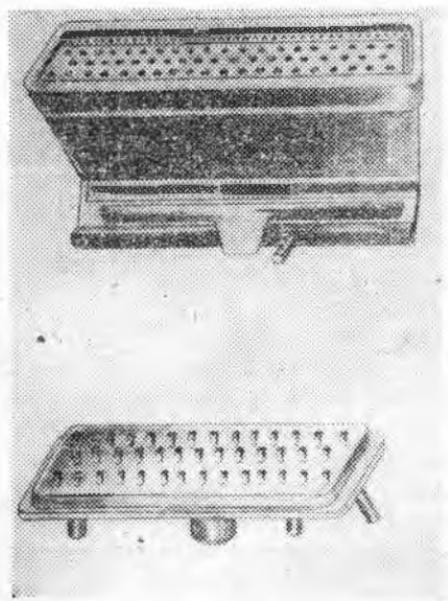


Рис. 14. Блок кольцевой камеры двигателя со штыревым соплом

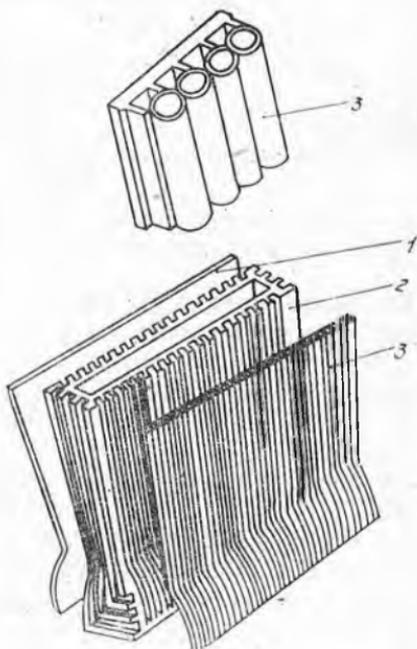


Рис. 15. Схема блока, изображенного на рис. 14

Охлаждения стенки обоих компонентов объясняется тем, что в камере подобной конструкции площадь поверхности, нуждающейся в теплозащите, больше, чем в камере с круглым соплом.

Для получения большого изменения силы тяги камеры без значительного снижения величины I_y необходимо одновременно изменять площадь проходных сечений форсунок смесительной головки и площадь критического сечения сопла камеры. Схема одной из таких экспериментальных конструкций показана на рис. 16. При подаче управляющего газа через штуцер 1 поршень 3, помещенный внутри корпуса камеры 4, перемещается вправо, пере-

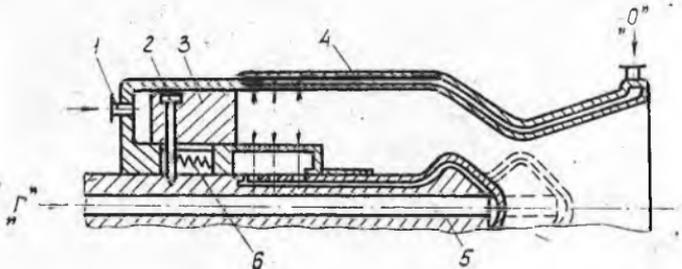


Рис. 16. Камера с изменяемой геометрией

крывая часть сопел форсунок окислителя и горючего и снижая расход топлива. Одновременно пальцем 2 перемещается в том же направлении игла 5, уменьшая площадь критического сечения сопла, что позволяет сохранить p_k постоянным. В результате этого при уменьшении силы тяги условия протекания процессов в камере практически не изменяются.

2. Выбор необходимых данных при проектировании системы регенеративного охлаждения

Выбор материала для изготовления внутреннего днища головки и стенки корпуса камеры зависит от свойств охладителя и величины плотности теплового потока от газа в стенку.

В первую очередь необходимо учитывать коррозионную активность компонентов. При использовании в качестве охладителя азотно-кислотных окислителей (HNO_3 , N_2O_4 , их смеси) стенка изготавливается из кислотостойких материалов — алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей. С охладителями — горючими (керосин, НДМГ, тонка, гидразин) можно использовать также медные, никелевые и титановые сплавы. Если охлаждение производится перекисью водорода, то нельзя использовать медные сплавы и сплавы, содержащие марганец, так как Cu и Mn являются катализаторами разложения H_2O_2 . При криогенных охладителях

(Н₂, О₂) могут использоваться все вышеуказанные материалы, так как они не охрупчиваются при низких температурах (кроме никеля, который при насыщении Н₂ охрупчивается, и титана, который в напряженном состоянии в среде кислорода легко возгорает).

Теплопроводность указанных выше материалов убывает в следующем порядке: медные, алюминиевые, никелевые, железные и титановые сплавы. Плотность теплового потока, передаваемого через стенку, будет максимальной в критическом сечении сопла и выражается формулой

$$q_{c \text{ макс}} = q_{c*} \left(\frac{\lambda}{h} \Delta T_c \right)^{0.5},$$

где h — толщина стенки;

λ — теплопроводность стенки;

$\Delta T_c = T_{cг} - T_{cх}$;

$T_{cг}$, $T_{cх}$ — температуры «горячей» и «холодной» поверхностей стенки;

q_{c*} — плотность теплового потока в критическом сечении сопла.

При ограничениях, наложенных на величины ΔT_c и h (см. ниже), с увеличением q_{c*} должна возрастать и величина λ . Поэтому при $q_{c*} > 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ для изготовления стенки выбирают медные сплавы, а на участке расширяющейся части сопла, где плотность теплового потока мала, а также при меньших q_{c*} — нержавеющие стали и титановые сплавы.

Выбор величины $T_{cг}$ производится из условия:
для высококипящих охладителей

$$T_{cг} = T_{cгд} - (100 - 150) \text{ К};$$

для низкокипящих охладителей

$$T_{cг} = T_{cгд} - (300 - 450) \text{ К},$$

где $T_{cгд}$ — допустимая температура «горячей» поверхности стенки, определяемая условиями обеспечения прочности, коррозионной и эрозийной стойкости материала. Поскольку явления коррозии и эрозии для большинства конструкционных металлов возникают при достаточно высоких температурах, величина $T_{cгд}$ ограничивается, в первую очередь, условием сохранения достаточной механической прочности материала. Последняя, как известно, характеризуется предельным значением напряжения σ^* , которое при неравномерном нагреве стенки по толщине определяется величиной ее средней температуры

$$T_{сд} = \frac{T_{сгд} + T_{схд}}{2},$$

где $T_{схд}$ — допустимая температура «холодной» поверхности стенки, величина которой зависит, в основном, от свойств охладителя. При фиксированном ее значении величина $T_{сгд}$ будет определять только величиной $T_{сд}$.

$T_{сд}$ оптимизирована по минимальной массе двигателя. Известно, что с увеличением T_c прочность материала все больше снижается. Если $T_c > T_{сд}$, то для обеспечения прочности стенки ее толщину необходимо увеличивать, что ведет к возрастанию массы камеры и двигателя. Если же $T_c < T_{сд}$, то для эффективного охлаждения стенки необходимо увеличивать ω_0 , что ведет к возрастанию потерь давления в тракте охлаждения ($\Delta p_0 \sim \omega_0^2$), к увеличению массы системы подачи топлива и всего двигателя. Следовательно, только при $T_{сд}$ масса двигателя будет минимальной.

Рекомендуемые величины $T_{сгд}$ для материалов стенки

| Материал | $T_{сгд}$, К |
|------------------------------|---------------|
| Алюминиевые сплавы | 700 |
| Медные сплавы | 800 |
| Титановые сплавы | 1000 |
| Нержавеющие стали | 1300 |

Выбор толщины стенки, изготовленной из заданного материала, определяется условиями обеспечения ее минимальной массы, технологичности изготовления, прочности и передачи через нее заданной величины q_c . Если требования минимальной массы ограничивают максимальную толщину стенки, то требования технологичности ограничивают ее минимальную толщину.

Условия обеспечения прочности стенки и передачи заданной величины q_c взаимосвязаны и зависят от величины p_e .

Конструкционную прочность стенки определяет, в основном, ее местная прочность, т. е. прочность стенки на участке между связями с рубашкой (рис. 17).

Стенку на этом участке можно рассматривать как балку единичной ширины, защемленную по концам и нагруженную перепадом давления: $\Delta p = p_0 - p_e$, где p_0 и p_e — соответственно давления охладителя и газа в камере в рассматриваемом сечении.

При условии, что материал стенки работает в области упругих деформаций, наибольшие изгибные напряжения в местах заделки

$$\sigma_{\text{п макс}} = \frac{\Delta p b^2}{2 h^2},$$

где b — длина неподкрепленного участка стенки.

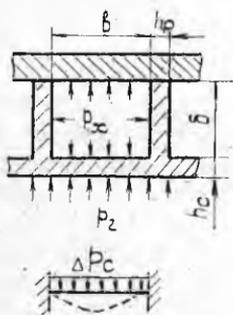


Рис. 17. К расчету на местную прочность стенки камеры

Коэффициент запаса прочности стенки

$$n_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_{н \text{ макс}}},$$

где σ_{τ} — предел текучести материала стенки при ее средней температуре T_c .

Из этих двух выражений при фиксированной величине « b »

$$h = b \sqrt{\frac{n_{\tau} \Delta p}{2 \sigma_{\tau}}}.$$

С увеличением p_e возрастает и q_e . На стационарном режиме охлаждения $q_c = q_e$. Для сохранения $T_c = \text{const}$ ($\Delta T_c = \text{const}$) необходимо пропорционально увеличить и скорость течения охлаждаителя ω_0 в тракте, что ведет к возрастанию гидравлических потерь давления охлаждаителя, пропорциональных ω_0^2 . Следовательно, при увеличении давления газа p_0 возрастает также, увеличивается Δp и для сохранения прочности стенки ее минимально допустимую толщину необходимо увеличивать (рис. 18, кривая 1).

С другой стороны, для сохранения заданного ΔT_c при увеличении p_e (q_e) необходимо толщину стенки уменьшать (рис. 18, кривая 2), так как

$$h = \lambda \frac{\Delta T_c}{q_c}.$$

Введя ограничения по массе стенки (прямая $b-b$) и по технологичности ее изготовления (прямая $a-a$), на графике можно определить область возможных значений h , выделенную штриховкой. Расчетное давление газа должно быть меньше $p_{e \text{ макс}}$, так как при работе двигателя всегда возникают колебания p_e около его среднего значения. В приведенной ниже таблице даны рекомендации по выбору толщины стенки корпуса и внутреннего днища головки камеры.

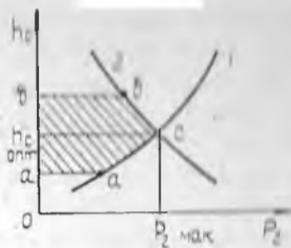


Рис. 18. К определению толщины стенки камеры

| Материал | Конструкция корпуса | h , мм | | $h_{\text{вн дн}}$, мм | |
|-------------------|----------------------------------|----------|------|-------------------------|------|
| | | мин | макс | мин | макс |
| Медный сплав | С фрезерованной стенкой | 1,0 | 1,5 | | |
| | С гофриров. проставкой | 0,8 | 1,2 | 4 | 6 |
| Нержавеющая сталь | С фрезерованной стенкой | 0,7 | 1,2 | | |
| | | 0,5 | 1,2 | 3 | 5 |
| | С гофриров. проставкой трубчатая | 0,3 | 1,2 | | |

С целью уменьшения массы конструкции желательнее h выбрать ближе к минимальному значению. Необходимую же величину теплового сопротивления $\frac{h}{\lambda}$ можно обеспечить нанесением на внутреннюю поверхность стенки тонкого слоя теплоизолирующего покрытия ($h_n = 0,05 - 0,25$ мм) из окислов кремния, алюминия или циркония (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2). В этом случае тепловое сопротивление двухслойной стенки находится по формуле

$$\frac{h_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{h \lambda_n + h_n \lambda}{\lambda \lambda_n}$$

Необходимая же прочность стенки обеспечивается уменьшением величины « σ ».

Выбор размеров тракта охлаждения. Паяно-сварные корпуса камер имеют многоканальные тракты охлаждения, прерывающиеся щелевыми участками в местах сварки деталей оребренной стенки или в местах изменения числа связей.

Определение размеров такого тракта осуществляется методом последовательных приближений, так как они взаимосвязаны с другими параметрами системы проточного охлаждения.

Вначале задаются величиной максимальной скорости течения охладителя $\omega_{0 \text{ макс}}$, которая должна быть в сечении тракта, совпадающем с критическим сечением сопла. Эта величина, как и $T_{\text{сж}}$, оптимизирована по минимальной массе двигателя, так как с увеличением ω_c возрастает α_0 , снижается T_c , h и уменьшается масса камеры, но возрастает Δp_0 и масса системы подачи. Оптимальная величина $\omega_{0 \text{ макс}}$ составляет: для жидких охладителей (кроме H_2) 20—50 м/с; для H_2 и газообразных охладителей 100—400 м/с, причем верхние значения принимаются для камер с большими величинами q_c .

Выбрав ω_{0*} , определим площадь проходного сечения условного щелевого тракта над критическим сечением сопла:

$$F_{0*} = \frac{\dot{m}_0}{(\rho_0 \omega_0)_*}$$

где ρ_{c*} — плотность охладителя.

Из геометрических соотношений камеры зазор щелевого тракта

$$\delta_{\text{ш}*} = \frac{F_{0*}}{2 \pi r_{0*}}$$

где r_{0*} — средний радиус с кольцевого сечения тракта охлаждения

$$r_{0*} = r_* + h + \frac{\delta_{\text{ш}*}}{2}$$

где r_* — радиус внутренней окружности сечения корпуса.

Переходя к многоканальному тракту при сохранении величины ω_{0*} получим

$$\delta_* = \delta_{ш*} \frac{2\pi r_{0*}}{i_k b_*};$$

где δ_* — высота канала;
 i_k — число каналов тракта.

Поскольку

$$\frac{2\pi r_0}{i_k} = s_p \text{ или } \frac{2\pi r_0}{i_k} = \frac{s_r}{2},$$

$$\text{а } s_p = b + h_p \text{ и } s_r = 2(b + h_r),$$

то, подставив эти выражения в предыдущее, получим, например, для ребер

$$\delta_{p*} = \left(\delta_{ш} \frac{b + h_p}{b} \right)_*,$$

где s_p, s_r, h_p, h_r — соответственно шаг и толщина ребра или гофра.

Размеры элементов тракта обычно рекомендуется выбирать в следующих пределах:

$$h_p = 0,8 - 1,4 \text{ мм};$$

$$b = 1,0 - 4,0 \text{ мм};$$

$$h_r = 0,3 - 0,6 \text{ мм};$$

$$\delta \geq 1,0 \text{ мм}.$$

Минимальные размеры элементов ограничиваются условием обеспечения технологичности изготовления деталей и, кроме того, b_{\min} и δ_{\min} — условием обеспечения наименьших потерь давления охладителя, а $h_{p\min}$ и $h_{r\min}$ — условием обеспечения прочности связей. Максимальные размеры $h_{p\max}$ и $h_{r\max}$ ограничены условиями обеспечения минимальной массы камеры и наибольшей величины коэффициента эффективности оребрения, а b_{\max} — условием обеспечения прочности стенки, так как при выбранной величине h

$$b_{\max} = h \sqrt{\frac{2\sigma_r}{n_r \Delta p}}.$$

Размеры элементов тракта охлаждения в критическом сечении сопла выбираются ближе к минимальным значениям. Толщина ребра и высота канала тракта по длине корпуса принимаются обычно постоянными, равными соответствующим размерам в критическом сечении, но при необходимости их величину на отдельных участках изменяют. При увеличении диаметра сечения сопла ширина канала изменяется пропорционально. В сечениях, где $b = b_{\max}$, число каналов необходимо увеличить.

После выбора исходных данных производится расчет системы проточного охлаждения [2].

3. Проектирование корпуса

После расчета системы теплозащиты корпуса производится его конструктивная компоновка с членением на сборочные единицы, а последних — на детали. Число сборочных единиц и деталей в них определяется размерами и конструкцией корпуса, свойствами материалов и технологией изготовления; возможностями производственной базы и соображениями экономики производства.

Сварные швы при соединении деталей подвергаются термообработке, зачистке и тщательному контролю. Наплывы металла, выступающие над поверхностью деталей, приводят к концентрации напряжений в шве, а также к появлению излишних гидравлических сопротивлений в тракте охлаждения и поэтому их удаляют.

Если детали стенки или рубашки изготовлены из плохо сваривающихся материалов, то для их соединения применяется вставка из металла, хорошо сваривающегося с материалами обеих деталей, или биметаллическая вставка, изготовленная пайкой материалов последних. При сварке стенок сборочных единиц длину неподкрепленного участка в месте формирования шва необходимо делать минимальной, обеспечивая при этом сварку без оплавления кромок гофров или ребер. Для улучшения охлаждения этого участка, лишённого ребер, следует путем соответствующего профилирования внутренней поверхности соединительного кольца обеспечить необходимую скорость движения охладителя.

При конструктивной компоновке корпуса необходимо определить места расположения коллекторов, кронштейнов крепления агрегатов к камере и камеры к летательному аппарату, воспламенителей, штуцеров замера давления, продувки, слива, а также способы их присоединения к корпусу. Пиросвечи и штуцера замера давления в камере, если они не установлены на головке, размещаются на цилиндрическом участке корпуса между головкой и фронтом пламени с тем, чтобы они не слишком нагревались под воздействием горячих газов. Корпус воспламенителя вставляется в отверстия, сделанные в рубашке и стенке, и приваривается еще до пайки сборочной единицы. Поскольку при этом часть каналов тракта охлаждения прерывается, снятием гофров (ребер) вокруг корпуса воспламенителя или штуцера образуется кольцевой канал для прохода охладителя.

Штуцер для продувки нижней полости головки располагается на кольце, соединяющем корпус с головкой, а для продувки пояса завесного охлаждения — непосредственно на обечайке его коллектора. Штуцера для слива жидкости из охлаждающего тракта устанавливаются в точках, занимающих самое низкое положение при испытаниях или эксплуатации двигателя (на поворотном коллекторе или на рубашке у среза сопла — см. рис. 4, место II).

Одновременно с конструктивной компоновкой производится выбор материалов для изготовления деталей корпуса. Поскольку материал стенки выбирается перед расчетом способа ее теплозащиты, то остается выбрать материал для изготовления рубашки и других несущих элементов конструкции. Они изготавливаются из высоколегированных сталей, сплавов типа 1X18H9T, ЭИ-437, ЭИ-654, ЭИ-787 и титановых сплавов. Затем производится расчет прочности деталей и их соединений.

На основе компоновочного чертежа изготавливаются чертежи деталей, чертежи сборочных единиц и всего корпуса. При этом производится уточнение технологии изготовления деталей и их соединения в сборочных единицах.

Основным требованием при изготовлении корпуса является обеспечение заданных размеров и формы газового и охлаждающего трактов, а также прочности элементов конструкции. Поэтому на чертежах деталей и сборочных чертежах указываются допуски на размеры и на погрешности формы (отклонение от теоретического профиля, некруглость критического сечения и среза сопла), на погрешность положения стыкуемых деталей (несоосность, биения торцев), указываются способы выполнения неразъемных соединений и характер сопряжения деталей при этом, требования к сварным и паяным швам (размеры, форма, категория, вид сварки, допустимые размеры дефектов — проплавов, подрезов, наплывов), технические указания на проведение испытаний. Жесткие допуски устанавливаются на толщину стенки и размеры охлаждающего тракта, так как от них зависит надежность системы теплозащиты стенки. Кроме того, на сборочном чертеже указываются сведения о дополнительной обработке поверхностей и о нанесении покрытий.

Дефекты, которые наблюдаются при изготовлении корпуса, являются следствием некачественного выполнения соединений деталей. Поэтому наряду с гидро- и пневмоопрессовкой вводится неразрушающий (рентгеновский или ультразвуковой) контроль мест сварки, а также разрезка контрольных сборочных единиц, количество которых от изготовленной партии оговаривается техническими условиями. Неразрушающий контроль позволяет выявить местные дефекты и, если возможно, устранить их (произвести, например, подварку). Вследствие этого количество дефектов корпуса, которые возникают при работе двигателя (трещины и прогары стенки), весьма невелико.

Контрольные вопросы

1. Назначение корпуса камеры и требования к нему.
2. Схема классификации корпусов камер.
3. Преимущества и недостатки отдельных типов корпусов, их конструкция.
4. Сопловые пасады, их классификация и конструкция.

5. Классификация способов теплозащиты элементов камеры.
6. Принцип выбора способа теплозащиты камеры.
7. Порядок проектирования корпуса камеры.
8. Технические условия на сборку и испытания корпуса камеры и методы их проверки.

Л и т е р а т у р а

1. Конструкция головки камеры двигателя: Методическое указание к лабораторной работе. — Куйбышев: КуАИ, 1982.
2. Пичугин Д. Ф. Конструкция и проектирование ДЛА: Конспект лекций, часть 3. — Куйбышев: КуАИ, 1975. — 88 с.

Лабораторная работа № 4

КОНСТРУИРОВАНИЕ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы — пользуясь изученным ранее материалом, провести предварительное конструирование камеры проектируемого двигателя.

Д о м а ш н е е з а д а н и е

1. Повторить материал лабораторных работ № 1, 2, 3.

А у д и т о р н о е з а д а н и е

1. Уточнить конструктивную схему камеры проектируемого двигателя.

2. Выбрать и обосновать конструкцию сборочной единицы «Сопловая часть» камеры проектируемого двигателя и сделать ее эскиз.

3. Выбрать и записать марки материалов, способы изготовления деталей и виды их соединений в этой сборочной единице.

4. Продумать и нарисовать виды соединений основных сборочных единиц камеры, записать порядок сборки камеры и назначить технические требования на ее сборку и испытания.

5. Выбрать параметры тракта охлаждения камеры в критическом ее сечении (материал, толщину стенки корпуса и внутреннего днища головки, $T_{сг}$, размеров тракта охлаждения).

КОНСТРУКЦИЯ РДТТ

Цель работы — изучение конструкции РДТТ.

Домашнее задание.

1. Изучить материал пособия [1], с. 2—6 и с. 19—35.
2. Ответить на следующие вопросы:
 1. В чем преимущества и недостатки РДТТ по сравнению с ЖРД?
 2. Конструктивные схемы камеры РДТТ.
 3. Назначение корпуса камеры РДТТ и требования к нему. Какие различия в назначении корпуса и требованиях к нему у двигателей твердого топлива и ЖРД?
 4. Что представляет собой несущая конструкция корпуса камеры сгорания и сопла?
 5. Преимущества и недостатки металлических корпусов и корпусов из композиционных материалов.
 6. Сопловый блок. Качающиеся и поворотные сопла, их устройство, преимущества и недостатки.
 7. Теплозащита корпуса камеры сгорания и сопла РДТТ (какие места камеры подвержены эрозии? Где требуется наиболее мощная теплозащита?).
 8. Какие вспомогательные устройства могут быть на камере РДТТ? Их назначение и устройство.

Аудиторное задание

1. Изучить материал пособия [2], с. 51—74, макеты двигателей Т-1, Т-2 и Т-3.
2. Записать требования к топливным зарядам с точки зрения прочности. Какими путями эти требования обеспечиваются?
2. Составить классификацию видов топливных зарядов и способов крепления их в камере.
4. Нарисовать конструктивную схему двигателя Т-1, обратив внимание на места соединений корпуса, поверхности крепления и горения топливного заряда. Записать способы теплозащиты сопла и камеры сгорания, меры против эрозии сопла.
5. Принимая, что топливный заряд двигателя Т-2 состоит из цилиндрических шашек, забронированный по торцам, нарисовать разрез двигателя. В увеличенном масштабе нарисовать эскиз соединения стальной и пластмассовой частей сопла.

6. Рассчитать коэффициент массового совершенства α двигателя Т-2. Принять, что масса конструкции двигателя 6,5 кг, топливная шашка имеет длину 275 мм и диаметр 52 мм, плотность твердого топлива $\rho_t = 1,65 \text{ г/см}^3$.

7. Нарисовать разрез двигателя Т-3 и обозначить его элементы.

Л и т е р а т у р а

1. Борисов В. А. Конструкция и проектирование РДТТ. — Куйбышев: КУАИ, 1982 — 72 с.

2. Конструкция РДТТ: Методические указания к лабораторной работе. — Куйбышев: КУАИ, 1980.

Составитель *Пичугин Дмитрий Федорович*

КОНСТРУКЦИЯ КОРПУСА КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Методические указания к лабораторной работе № 3

Редактор М. И. Логунова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 27.12.82 г. Подписано в печать 24.01.83 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Высокая печать. Гарнитура Л1-10.
Усл. п. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5 Тираж 450 экз. Заказ 4.
Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С. П. Королёва.
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ. КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.