

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

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

*В. П. Лукачев,
В. В. Токарев,
А. С. Фрейдин*

ВЫБОР СХЕМЫ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ ВРД

*Утверждено редакционным советом института
в качестве учебного пособия*

В. П. Лукачев, В. В. Токарев, А. С. Фрейдлин
Выбор схемы форсажной камеры ВРД: Учебное пособие. —
Куйбышев: КуАИ, 1982. — 63 с.

В учебном пособии по курсу «Теория воздушно-реактивных двигателей» на базе обзора современной иностранной патентной литературы рассмотрены вопросы, связанные с выбором конструктивной схемы форсажных камер ВРД. Приведен большой иллюстративный материал. Рассмотрены основные характеристики камер, проблемы, возникающие при создании форсажных камер, и методы их решения.

Книга предназначена для студентов двигателестроительного факультета, выполняющих курсовой и дипломный проекты, а также для факультета повышения квалификации.

Ил. 44, табл. 3, библи. — 11 назв.

Рецензенты: А. В. Талантов, П. Г. Трофимов

Введение

В существующих учебниках [1, 2] и учебных пособиях по курсу «Теория ВРД», а также в монографиях, посвященных камерам сгорания [3, 4, 5], главное внимание уделяется основным камерам сгорания. Организация рабочих процессов в форсажной камере современных ТРДФ, и особенно в камерах ТРДДФ, существенно отличается от их организации в основных камерах. Однако учебной литературы и специальных монографий по этому вопросу пока недостаточно.

По проблемам проектирования форсажных камер известность получили книги А. В. Талантова [6], Б. В. Раушенбаха и др. [7]. В этих книгах приводятся основы теории и расчета форсажных камер и камер ЦВРД с однородным потоком топливной смеси. И хотя в них не рассмотрены реальные процессы гетерогенного горения, описание основ горения в камерах сближает теорию горения с практикой организации процессов в форсажных камерах. Но и в этих книгах не отражены различные возможности практической организации рабочего процесса и соответствующие конструктивные схемы форсажных камер.

В предлагаемом учебном пособии показаны основные направления современного развития форсажных камер и пути решения проблем, возникающих при их проектировании и эксплуатации.

Применение форсажной камеры связано с решением трех общих проблем. Первая из них — аэродинамика камеры; вторая — организация процесса горения, обеспечивающего высокое значение η_z и требуемые эксплуатационные характеристики; третья — обеспечение статической прочности камеры, работающей при давлении газа до 5 кг/см² и температуре газа до 2000К при незначительной толщине стенок (1—2 мм). Первая и третья проблемы проектирования решаются в основном расчетным путем на основании теоретических и экспериментальных зависимостей [6, 7, 8]. Проблема организации процесса горения, вклю-

чающая в себя выбор принципиальной схемы камеры, сегодня не может быть решена расчетным путем. В то же время достижимый уровень характеристик камеры в основном зависит от степени соответствия схемы камеры условиям ее эксплуатации и заданным параметрам потока на входе в нее. При решении вопросов статической прочности камеры решаются задачи тепловой защиты деталей камеры и обеспечения их механической прочности.

Форсажная камера современного ТРДДФ является узлом двигателя, от качества которого в значительной степени зависят характеристики двигателя в целом.

Если раньше форсажная камера ТРДФ была однорежимным узлом, который только включался и выключался, то сегодня в системе, например ТРДДФ для СПС с $M_{II} = 2,0$, она используется для обеспечения различных режимов полета, и в том числе весьма ответственного режима-крейсерского сверхзвукового полета [9]. Широкое использование форсажных режимов требует полной устойчивости и высокой эффективности горения. Требуемая полнота сгорания возросла от 85—90 до 99%.

Получить значение $\eta_z = 99\%$, применяя традиционные для ТРДФ рекомендации по организации процесса в камере, не представляется возможным [6]. Решение этой проблемы связано с разработкой новых оригинальных методов организации горения и конструктивных схем форсажных камер. Широкий диапазон требований к камере и изменения условий на входе в камеру при различных полетных условиях требуют большой гибкости в выборе схемы и конструкции элементов камеры. Поэтому в пособии рассматриваются организация процесса горения и принципы выбора соответствующей конструктивной схемы камеры. Более конкретно вопросы, которые при этом возникают, отражены во второй главе.

В первой главе рассмотрены основные характеристики камер, к которым предъявляются требования, вытекающие из тактико-технических требований (ТТТ) на двигатель.

В третьей главе на примерах различных конструктивных схем форсажных камер показаны возможные пути решения проблем организации процесса горения.

Материалом для написания пособия послужили статьи зарубежных авторов и описания зарубежных патентов, которые были опубликованы в период 1960—1980 гг.

Авторы выражают благодарность рецензентам за помощь в подготовке рукописи к изданию.

Основные условные обозначения

W_0 — скорость потока, м/с	ε — степень загромождения стабилизатором сечения камеры
λ — приведенная скорость	G_v — расход воздуха
a — критическая скорость звука	Θ — степень повышения температуры в ФК
k — показатель адиабаты	C_x — коэффициент сопротивления
P_0 — давление, Па	H — высота полета
T_0 — температура, К	M — число Маха
P — тяга двигателя, Н	m — степень двухконтурности
σ — отношение полных давлений	ρ — плотность
ξ — коэффициент гидравлических потерь	h — высота основания стабилизатора
α — коэффициент избытка воздуха	ФК — форсажная камера
η_z — коэффициент полноты сгорания	ТВС — топливо-воздушная смесь
Q — количество тепла	

И н д е к с ы:

0 — в сечении на входе в ФК	т — топливо
I — наружный контур ТРДДФ	в — воздух
II — внутренний контур ТРДДФ	* — параметры торможения
ф — сечение на выходе из ФК	ц — зона циркуляции
м — миделевое сечение	

Рабочий процесс в форсажной камере

§ 1. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ И КАМЕРЫ ПВРД

Принципиально конструкции форсажных камер ТРДФ, ТРДДФ и камер сгорания ПВРД идентичны (рис. 1, 2, 3). Все они имеют диффузор для уменьшения скорости потока воздуха, стабилизаторы в виде плохообтекаемых тел для воспламенения ТВС. Впрыск топлива в поток воздуха производится перед стабилизаторами центробежными или струйными форсунками.

Схема процесса горения в форсажной камере показана на рис. 4. За стабилизаторами пламени образуются зоны обратных токов, из которых вытекает высокотемпературный ($T_g^* \geq 1500\text{K}$) газ, поджигающий ТВС. Пламя, распространяющееся от стабилизаторов и сносимое потоком смеси, образует фронт пламени, расположенный под углом к направлению потока. Воспламенение смеси происходит при пересечении ею фронта пламени.

Существует три типа форсажных камер ТРДДФ — камеры без смещения потоков I и II контуров, со смещением потоков и камеры сгорания, располагаемые во II контуре.

Основное различие между процессами горения в ПВРД и форсажных камерах ВРД состоит в том, что в форсажной камере концентрация кислорода на входе понижена, а температура газа соответственно повышена, скорость соответственно тоже выше. Скорость газа в ТРДФ составляет 150—160 м/с против 60—80 м/с в ПВРД.

Условия организации горения в ПВРД приближаются к условиям в камерах ТРДДФ, что проявляется в определенной идентичности фронтных устройств.

Существенным отличием камеры сгорания ГПВРД от камер ПВРД является отсутствие механических стабилизаторов пла-

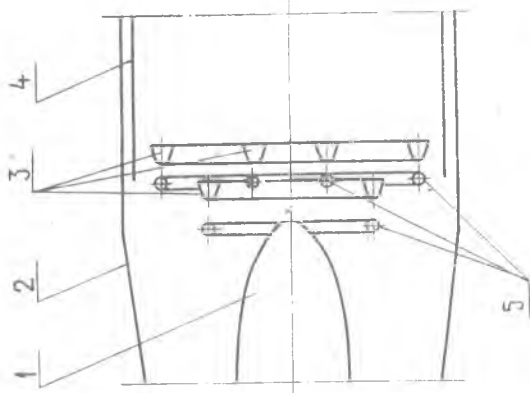


Рис. 1. Схема форсажной камеры ТРДФ: 1 — стекатель; 2 — корпус камеры; 3 — стабилизаторы пламени; 4 — тепловой экран; 5 — топливные коллекторы с форсунками

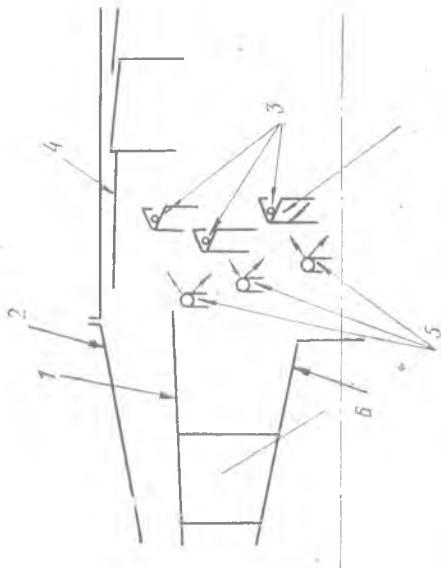


Рис. 2. Схема форсажной камеры ТРДФ: 1 — разделитель потоков I и II контуров; 2 — корпус камеры; 3 — стабилизаторы пламени; 4 — тепловой экран; 5 — топливные коллекторы с форсунками; 6 — стекатель

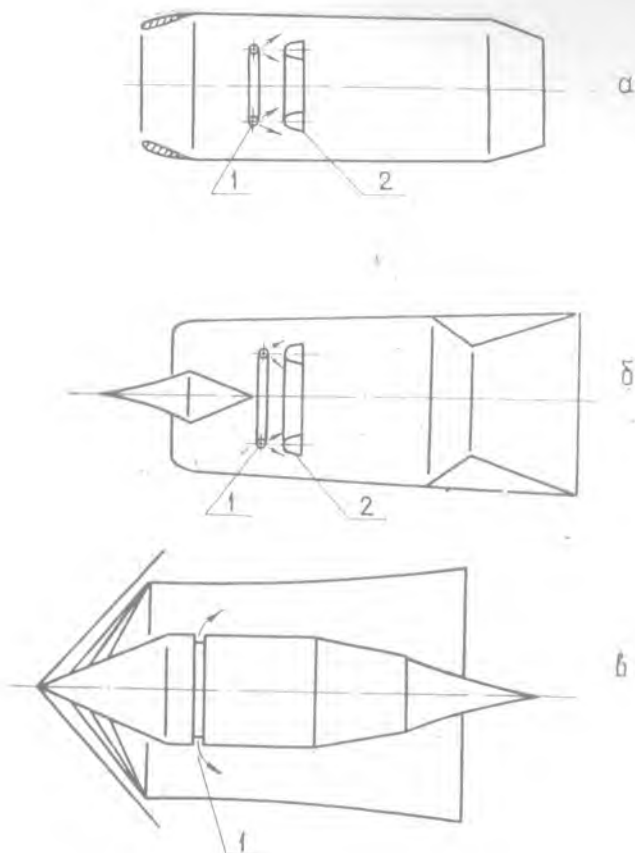


Рис. 3. Схема ПВРД: а — дозвуковой ПВРД; б — сверхзвуковой ПВРД; в — гиперзвуковой ПВРД; 1 — топливный коллектор с форсунками; 2 — стабилизатор пламени

мени. Воспламенение в них ТВС происходит вследствие высокой температуры воздуха в косых скачках уплотнения, которые образуются при торможении сверхзвукового потока воздуха.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР

Характеристики камер — это зависимости параметров, характеризующих работу камеры (η_z , σ , $\alpha_{ср}$ и др.), от изменения режимов и условий работы, характеризующихся параметрами потока на входе в камеру (W_0 , T_0 , P_0 , α).

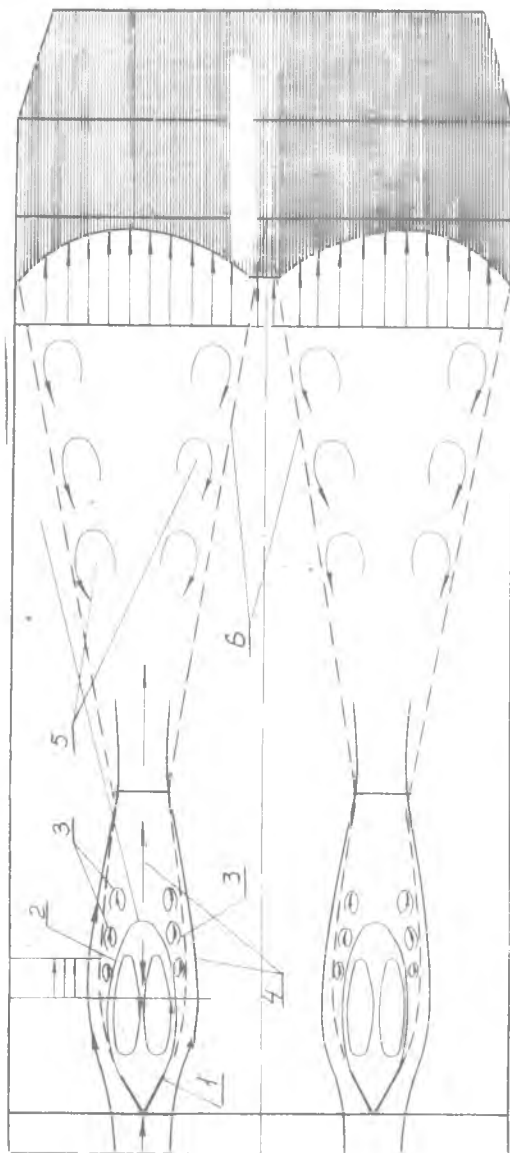


Рис. 4. Принципиальная схема процесса горения в форсажной камере: 1 — стабилизатор пламени; 2 — граница зоны обратных токов; 3, 5 — вихревой слой смешения; 4 — направление течения; 6 — фронт пламени

Если изменения этих четырех входных параметров обусловлены изменением условий эксплуатации двигателя на самолете, то эти характеристики называются эксплуатационными.

Рассмотрим основные характеристики форсажных камер:

аэродинамическая зависимость потерь полного давления σ от приведенной скорости λ_0 ;

химическая зависимость η_z от α и от параметров потока W_0, T_0, P_0 ;

концентрационные пределы горения — зависимость устойчивого горения от параметров воздуха W_0, T_0, P_0 , изменяющихся соответственно по высоте и скорости полета;

степень форсирования тяги — отношение форсажной тяги к тяге на бесфорсажном режиме.

Аэродинамическая и химическая характеристики определяют эффективность термодинамического цикла двигателя, поэтому к ним предъявляются высокие требования, контроль этих характеристик на двигателе проводится по правилам определения параметрической надежности.

Остальные характеристики относятся к эксплуатационным и к ним в ТТТ на двигатель предъявляются требования, выполнение которых обеспечивает функциональную надежность двигателя.

С примерным содержанием требований к функциональной и параметрической надежности можно ознакомиться в [3], а конкретное содержание требований к основным характеристикам камер зависит от ТТТ на двигатель и условий работы камеры в эксплуатационной области самолета.

Аэродинамическая характеристика (потери полного давления)

Течение газа по тракту форсажной камеры, камеры ПВРД сопровождается падением полного давления, что снижает к.п.д. теплового цикла двигателя.

Потери полного давления зависят от двух факторов. Один из них — падение давления в результате аэродинамического сопротивления, которое складывается из потерь на обтекание стабилизаторов, коллекторов, трения в каналах и потерь на смешение струй и слоев газа; другой — изменение давления, связанное с увеличением скорости потока газа при подводе тепла — тепловые потери.

Гидравлическое качество камеры оценивается коэффициентом ξ :

$$\xi = 2 \frac{P_0^* - P_d^*}{\rho W_0^2} \quad (1)$$

или коэффициентом восстановления полного давления

$$\sigma_r = \frac{P_{\Phi}^*}{P_0^*} = 1 - \xi \frac{k}{2} M_0. \quad (2)$$

Основные потери полного давления ($1 - \sigma_r$) приходятся на течение в диффузоре и на обтекание стабилизаторов пламени. Их определяют по номограммам.

Потери при обтекании стабилизаторов зависят от их формы, степени загромождения ими канала камеры (рис. 5). Изменения величин потерь в зависимости от скорости показано в виде номограммы (рис. 6). Требуемые в техническом задании на проектирование камеры значения гидравлических потерь обычно составляют 3—5%.

Тепловые потери зависят от скорости потока, подогрева газа и формы камеры. Для цилиндрического канала величину тепловых потерь можно представить в виде зависимости

$$\sigma_r = \frac{q(\Theta_0)}{q(\Theta_{\text{н}})} \sqrt{\Theta_0} \quad (3)$$

где Θ — степень подогрева газа в камере.

Влияние формы канала и закона тепловыделения на величину тепловых потерь рассмотрено в работе [10].

Основное влияние на потери в камере оказывает скорость. В табл. 1 показано изменение составляющих общих потерь ($1 - \sigma$), где $\sigma = \sigma_r + \sigma_{\tau}$, в зависимости от скорости в камере.

Т а б л и ц а 1

Потери давления, %	$M_0 = 0,2$	$M_0 = 0,3$
Потери в диффузоре	4,2	4,2
Потери на стабилизаторе при $\epsilon = 35\%$	2,7	5,9
Потери на трение	0,7	2,3
Тепловые потери	2,9	6,1
Общие потери	9,5	18,5

Из таблицы следует, что увеличение скорости газа в камере от $M_0 = 0,2$ до $M_0 = 0,3$ приводит к росту потерь \sim в 2 раза, что при температуре газа 2000 К обуславливает уменьшение степени форсирования тяги на 10%.

Представляет интерес сравнение форсажных и основных камер сгорания по коэффициенту гидравлических потерь ξ .

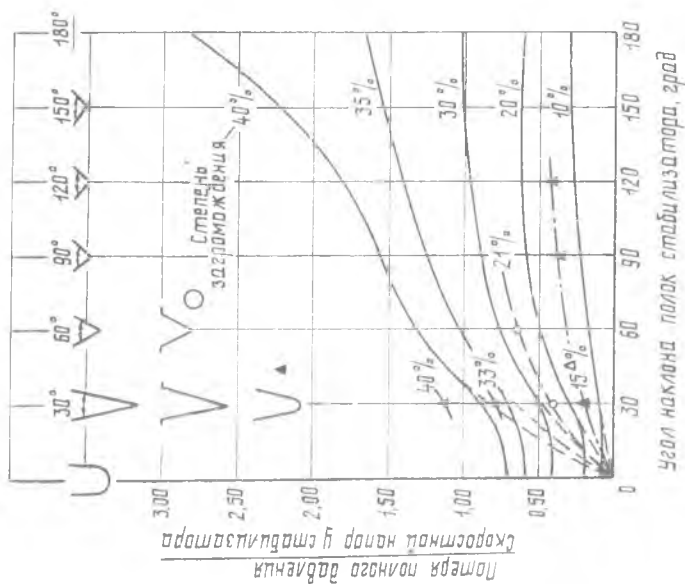


Рис. 5. Влияние формы стабилизатора пламени (угла наклона полок) на потери давления

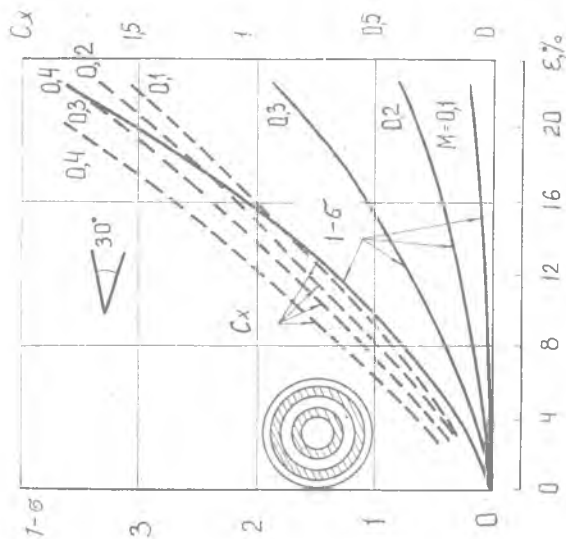


Рис. 6. Потери полного давления для двух концентрично установленных стабилизаторов (при горении)

Из рис. 7 видно, что для достижения обычного уровня потерь $\sigma_r = 0,95$ в форсажных камерах при $M_m = 0,2 - 0,3$ ξ равен 1—2, а в основных камерах при $M_m = 0,07$ значение ξ достигает 10. Такая разница в значениях ξ объясняется тем, что габариты форсажной камеры и скорость газа в ней определяют мидель летательного аппарата, а он ограничен условиями его внешней аэродинамики. Большая скорость в форсажной камере по сравнению с основной не позволяет проектировать ее с большим ξ .

Скорость воздушного потока в миделевом сечении основных камер сгорания по условиям компоновки камеры на двигателе значительно ниже ($M_m = 0,07 - 0,14$).

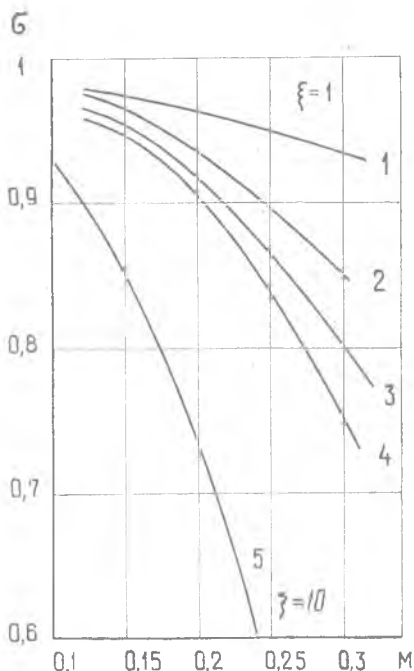


Рис. 7. Влияние чисел M и ξ на потери полного давления в камере: 1 — $\xi = 1$ — прямоточная камера; 2, 3, 4, 5, — соответственно $\xi = 2, 3, 4, 10$ — основная камера сгорания

Химическая характеристика (коэффициент полноты сгорания)

Коэффициент полноты сгорания есть отношение действительного приращения энтальпии газа к теплу, подведенному с топливом:

$$\eta_z = \frac{i_{\Phi}^* - i_0^*}{Q} \quad (4)$$

где i_{Φ}^* , i_0^* — энтальпия газов на выходе из камеры сгорания и входе в нее;

$Q = G_T \cdot H_u$ — теоретическое тепло, которое может быть получено при полном сгорании топлива G_T с теплотворной способностью H_u .

Требуемый уровень η_z для форсажных камер составляет 90—99%.

Эффективность сгорания топлива зависит от физических процессов, предшествующих ему: распыливания, испарения, смешения топлива с воздухом, воспламенения смеси, от параметров потока P_0 , T_0 , W_0 , α и от длины камеры.

Рассмотрим влияние физических параметров на эффективность процесса горения.

Снижение давления воздуха P_0 неблагоприятно влияет на горение, так как при этом:

- увеличивается диаметр капель и, следовательно, возрастает время, необходимое для испарения и сгорания капель топлива;
- ухудшается соотношение сил, вызывающих турбулентное перемешивание, и сил вязкости;

- возрастает энергия, необходимая для воспламенения, и температура воспламенения топлива;

- усиливается тенденция к затуханию пламени;

- уменьшается скорость химической реакции в смеси топлива с воздухом.

Снижение температуры T_0 отрицательно сказывается на горении, поскольку при этом:

- уменьшается скорость испарения;

- увеличивается время задержки воспламенения;

- замедляется реакция горения;

- уменьшается скорость распространения пламени.

Увеличение скорости W_0 потока на входе в камеру нежелательно в основном потому, что оно связано с уменьшением времени пребывания смеси в камере, в течение которого должен завершиться процесс. Кроме того, хотя увеличение скорости и выгодно для турбулентного перемешивания, слишком быстрое смешение холодной смеси с горячей смесью может привести к затуханию пламени.

Состав смеси α — его влияние на полноту сгорания проявляется в том, что максимальное значение его достигается вблизи стехиометрии.

Количественное влияние перечисленных параметров на полноту сгорания различно и определяется конструкцией камеры.

Процесс конструирования форсажной камеры (особенно для ТРДДФ) на заданные параметры (P_0 , T_0 , W_0 , α) предполагает разработку схемы и устройства для осуществления в камере процессов (распыливания, стабилизации пламени и т. д.), позволяющих в максимальной степени нейтрализовать отрицательное влияние какого-либо физического параметра на полноту сгорания. Поэтому достижение высокой эффективности сгорания неизбежно требует усложнения конструкции. Значение $\eta_z = 99\%$ в форсажной камере II контура ТРДДФ, работающей в экстремальных условиях по температуре воздуха, было получено только в результате создания сложной конструкции.

Срывная характеристика (концентрационные пределы горения ТВС)

Для устойчивой работы форсажной камеры важное значение имеет диапазон рабочей области концентрации используемого топлива. Размеры этой области зависят от двух процессов: смеобразования, степени испаренности топлива и стабилизации

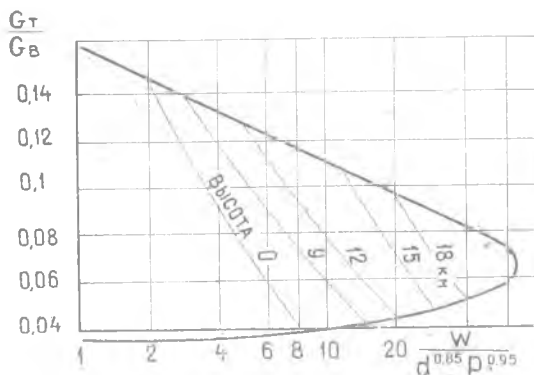


Рис. 8. Диапазон устойчивого горения

пламени. На рис. 8 показана область предельных отношений $\frac{\text{топливо}}{\text{воздух}} = 1/\alpha L_0$ при которых обеспечивается горение в зависимости от критерия стабилизации $W_0/D^{0.85} P_0^{0.95} T_0^{1.7}$. Данные получены для одиночного стабилизатора при распыливании топлива перед ним.

Концентрационные пределы горения керосина узки ($\alpha = 0,6-4$). Они достаточны лишь для однорежимного ТРДФ и совершенно не обеспечивают устойчивого горения в требуемом диапазоне изменения составов смеси, необходимым для эксплуатации ТРДДФ. В форсажной камере ТРДДФ диапазон требуемого изменения — $\alpha_2 = 1,1 - 40$. Для достижения такого диапазона приходится применять многоступенчатую систему подачи топлива в различные места камеры. Топливо подается в последовательно включаемые коллекторы, число которых может достигать 7—9.

Степень форсирования тяги

Эффективность превращения скрытой теплоты топлива в тягу двигателя наиболее полно оценивается степенью форсирования тяги, равной отношению тяги на форсажном режиме к тяге на бесфорсажном режиме:

$$\bar{P} = \frac{P_{\Phi}}{P_{0i\Phi}} = \sqrt{\frac{T_{\Phi}^*}{T_0^*} \left[1 - \left(\frac{P_{\Phi}^*}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5)$$

Степень форсирования зависит не только от коэффициента полноты сгорания, характеризуемого отношением T_{Φ}^*/T_0^* , и от потерь полного давления газа $\sigma = \frac{P_{\Phi}^*}{P_0^*}$, но и от однородности поля температур на выходе из камеры.

Степень форсирования с точки зрения требований по тяге, предъявляемых к двигателю, позволяет наиболее полно оценивать совершенство камеры или сравнивать варианты форсажных камер в системе двигателя. Например, многорежимность форсажной камеры ТРДДФ обеспечивается применением нескольких зон горения. При одинаковой полноте сгорания величина эффективной тяги зависит от качества перемешивания слоев газа с целью достижения равномерного профиля температуры на выходе из камеры. В предельном случае (при отсутствии смешения) потери тяги могут достигать $\sim 19\%$ при равных значениях η_z . При сравнении этих камер по полноте сгорания не выявляются различия их влияния на тягу двигателя.

Глава II

Основные проблемы горения

§ 1. ОРГАНИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ В ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЕ ДРДД

Круг проблем в организации горения и сложность их конструкторского решения определяются условиями сжигания топлива, которые зависят от характерных входных параметров (T_0 , P_0 , W_0 , α), и требованиями к величине выходных параметров форсажной камеры (η_z , σ , $\alpha_{ср}$).

Использование холодного воздуха второго контура ТРДД в форсажной камере затрудняет стабилизацию пламени и приводит к возникновению вибрационного горения. При сжигании топлива в горячем газе I контура в диапазоне $\alpha_z \geq 1,1$ эти проблемы не возникают.

В ТРДФ при высоких температурах газа за турбиной возникает проблема охлаждения корпусов камеры.

Наличие канала II контура в ТРДДФ, соединяющего форсажную камеру с компрессором, породило проблему неустойчивой работы камеры. В ТРДФ эта проблема отсутствует ввиду критического перепада давления на турбине, защищающего компрессор от возмущений, возникающих в камере.

Низкие температуры воздуха и широкий диапазон работы по α_2 создали в ТРДДФ (особенно предназначенных для СПС) проблему полноты сгорания. Полнота сгорания при температурах воздуха менее 600 К значительно меньше (рис. 9) требуемой (96—99%).

Рассмотрим проблемы организации горения в форсажных камерах ВРД и основные методы их решения.

α_2

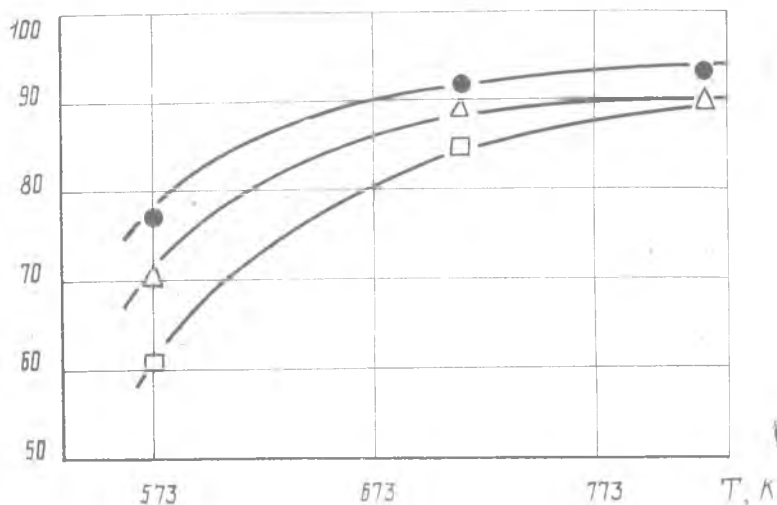


Рис. 9. Влияние температуры воздуха на полноту сгорания:
 ● — ● — $\alpha = 1,1$; \triangle — \triangle — $\alpha = 1,4$; \square — \square — $\alpha = 1,7$

§ 2. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ

Проблема стабилизации пламени в основном присуща форсажным камерам ТРДДФ, что обусловлено использованием в них холодного воздуха ($T_{H1}^+ < 500 K$) при потребном широком диапазоне горения по составу смеси: $\alpha_2 = 1,1 - 40$, превышающем концентрационные пределы воспламенения топлива (керосина).

Диапазон стабилизации пламени по α связан с параметрами потока соотношением

$$\frac{W_{ст}}{P_0 d} = C \frac{T_{II}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{II}}\right)^3} e^{-\frac{E}{RT_{II}}} \quad (6)$$

- где $W_{ст}$ — скорость у кромок стабилизаторов, м/с;
 d — размер стабилизатора, м;
 C — экспериментальный коэффициент, равный 1,5 и 2,5 $\left(\frac{м^2}{с \cdot кг \cdot град}\right)$ для богатых и бедных смесей соответственно;
 E — энергия активации, моль;
 T_{II} — температура газов в зоне циркуляции, К;
 R — газовая постоянная, $\frac{кДж}{моль \cdot град}$.

Эта зависимость характеризует первое направление решения проблемы стабилизации пламени:

- общее повышение температуры воздуха T_0 ;
- создание в камере локально повышенных значений T_0 , обеспечивающих устойчивое горение за стабилизатором.

Конструктивно решение этой проблемы достигается смещением потоков I и II контуров до фронтального устройства, размещением стабилизаторов пламени в следе и соосно с каналами для горячего газа за лепестковым смесителем.

В результате такого сочетания стабилизаторы пламени, располагаемые на периферии камеры (куда поступает холодный воздух из II контура), обтекаются слоями газа с температурой более высокой, чем T_{II}^* .

Изменение только параметров, входящих в зависимость (6), не позволяет получить полностью устойчивое горение в диапазоне $\alpha = 1,1 - 40$.

Второе направление решения проблемы стабилизации пламени, характеризующееся зависимостью (6), — получение максимальной температуры газа в зоне циркуляции T_{II} . При этом величина T_{II} не должна зависеть от параметров потока (α, W_0, T_0, P_0), обтекающего стабилизатор.

Это положение реализуется путем организации автономного очага горения за стабилизатором с коэффициентом избытка воздуха в зоне циркуляции $\alpha_{II} \approx 1$ и неизменным при изменении α_2 в потоке. Конструктивно это достигается подачей строго дозированного количества топлива в зону циркуляции из условия $\alpha_{II} \approx 1$. Для такого дозирования топлива необходимо знание количества воздуха, содержащегося в зоне циркуляции, и влияния на его величину параметров потока. Расчет воздуха в зоне циркуляции можно производить по формуле

$$G_{в.ц} = 0,065 G_{в} \frac{W_0}{T_0^{0,75}} \frac{\epsilon^{1,5}}{(1-\epsilon)^{0,5}} \quad (7)$$

Применяется и другой конструктивный вариант решения — стабилизация горения струями пламени, вытекающими из форсажной камеры, в которой горение протекает при $\alpha = \text{const}$ и полностью изолировано от внешних условий.

В форсажных камерах и камерах ПВРД в зависимости от величин W_0 , P_0 , T_0 , α , условий эксплуатации и от предъявляемых требований к характеристикам процесса применяются все перечисленные методы решения проблемы (раздельно или в сочетании).

§ 3. ПУТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

В форсажных камерах может возникать высокочастотное (ВЧ) вибрационное горение, обычно с колебаниями газа в поперечной плоскости, перпендикулярной к оси камеры, с частотами 300—1500 Гц и низкочастотное (НЧ) — в 30—300 Гц с продольным распространением волн.

Высокочастотное вибрационное горение возникает чаще в двигателях с большими температурами газа перед турбиной, высоким давлением в форсажной камере и при увеличенной относительной площади стабилизаторов пламени, т. е. в условиях, способствующих росту скорости тепловыделения.

Низкочастотное вибрационное горение возникает, как правило, в потоке холодного воздуха при низком давлении, бедной смеси и высокой скорости течения, а также при медленном испарении топлива.

Поскольку на разных режимах работы двигателя параметры воздуха в форсажной камере ТРДДФ меняются в широких пределах, в одной и той же камере возможно появление колебаний давления газа обоих видов. На малых высотах при больших числах $M_{п}$ характерно появление ВЧ-колебаний; НЧ-колебания обычно возникают на больших высотах при малых $M_{п}$, где невелики давления и температуры в форсажной камере.

Первый путь предотвращения вибрационного горения — снижение возбуждающего потенциала. Оно достигается выведением зоны горения (смещением стабилизаторов) из области максимальных амплитуд давления, изменением (локальным) коэффициента избытка воздуха в смеси до величин, при которых скорость реакции становится сравнительно нечувствительной к изменениям давления и температуры или сколько-нибудь заметному изменению скорости реакции предшествует ее зна-

чительное запаздывание по отношению к моменту изменения давления (температуры).

Второй путь — повышение демпфирующего потенциала. Оно осуществляется установкой в камере акустических экранов.

§ 4. ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ

Вследствие кратковременности использования форсажных режимов на ТРДФ (взлет и разгон) и благоприятных условий в ней для эффективного горения топлива (высокие температуры газа — более 700 К) получение $\eta_z > 85\%$ (см. рис. 9) не представляет проблемы [6].

При длительном применении форсажных режимов, и особенно при установке ТРДДФ на СПС, требуются высокие значения полноты сгорания (96—99%) при низких температурах и, в том числе, на очень бедных смесях ($\alpha_z = 4 - 6$). В форсажной камере ТРДДФ холодный воздух II контура ($T_{II} \leq 523$ К) оказывается значительным препятствием для достижения высоких значений ($\eta_z \geq 85\%$) при использовании традиционных схем (см. рис. 9).

Проблема полноты сгорания в ТРДДФ решается применением смесителей, стабилизаторов со стехиометрическим режимом горения в зоне циркуляции, форкамер и в ТРДДФ_{II} — камер сгорания, конструктивно подобных основным камерам.

§ 5. ДОСТИЖЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ФОРСАЖНАЯ КАМЕРА — ДВИГАТЕЛЬ НА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Проблема газодинамической устойчивости относится в основном к форсажным камерам в системе ТРДДФ.

Условие устойчивости течения в компрессоре — это отсутствие за ним возмущений в виде волн давления, уменьшающих запас по помпажу. Обычно полагают, что заброс давления за компрессором не должен превышать 2—5% по степени сжатия в компрессоре.

Источник возмущений — процесс горения в форсажной камере.

Волны давления возникают при воспламенении в ФК и включении очередных топливных контуров. Волны разряжения возникают при частичном или полном срыве пламени, выключении топливных контуров.

Величина волн давления и разряжения определяется количеством топлива, которое способно воспламениться, и пульсациями пламени при его воспламенении.

К усилению неустойчивости воспламенения топлива и соответственно к колебаниям давления приводит кипение топлива в начальный момент его поступления в коллектор. Обычно температура стенок коллектора равна температуре газа, т. е. $T_{ст} \geq \geq 500^\circ\text{C}$. При переходе с бесфорсажного режима на форсажный кипение топлива затрудняет его воспламенение.

Проблема устойчивости системы форсажная камера-компрессор решается путем уменьшения величины возмущения. Конструктивное решение — фронтовые устройства, способные устойчиво воспламенять топливо в малых количествах.

Уменьшению величины «заброса» давления при воспламенении топлива способствует предварительное раскрытие реактивного сопла (увеличение площади его критического сечения) или уменьшение количества топлива в коллекторах перед включением подачи топлива в последующие коллекторы.

Ослабление влияния кипения топлива в начальный момент достигается согласованием соотношения между расходом топлива и тепловыми потоками к топливу от стенок коллектора.

§ 6. ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ КАМЕРЫ

При достижении в ТРДФ температуры газа перед турбиной порядка 1500 К и выше возникает проблема охлаждения форсажной камеры и реактивного сопла из-за недопустимо высокой температуры газа (1150 К) на входе в камеру. Допустимая температура работоспособности материалов, из которых изготавливаются экраны и корпус камеры, не превышает 900°C .

В ТРДФ проблема решается путем постоянного отбора части воздуха от компрессора и перепуском его по внешнему кольцевому каналу в форсажную камеру. В результате такого перепуска двигатель превращается в двухконтурный с $m \leq 0,4$.

Высокие температуры цикла в таком двигателе с избытком компенсируют потери на отбор воздуха.

В ТРДДФ и ПВРД проблемы охлаждения стенок камеры, экранов и реактивного сопла не существует ввиду большого хладоресурса воздуха II контура, которым охлаждаются названные узлы.

Основные схемы форсажных камер

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Результаты исследования процесса горения пока не позволяют разработать достоверную методику проектирования (выбора принципа организации процессов) форсажной камеры и камеры ПВРД. Поэтому конструкции камер определяются в основном эмпирически. В целом превращение смеси топлива и воздуха в продукты сгорания осуществляется различными путями, о чем свидетельствует большое разнообразие конструкций форсажных камер, патентов и авторских свидетельств на конструкции, реализующие это превращение. Поэтому конструктор в своих поисках должен исходить из целого ряда возможных методов. Единственного решения проблемы сгорания пока не существует, основные процессы — смешение топлива, воздуха и газов, химические реакции и т. д. — можно комбинировать или разделять самыми различными способами. Причем в оптимальной конструкции форсажной камеры наиболее полно следует учитывать то, что продиктовано свойствами и поведением воздуха, топлива и пламени, и те требования, которые накладывают условия полета и двигателя.

Данный раздел посвящен описанию различных конструкций форсажных камер с более или менее удачными компромиссными решениями перечисленных ранее требований и условий. Предлагаемые конструкции не следует рассматривать как единственные решения. Очевидно, что возможны многочисленные комбинации основных элементов (узлов, деталей) камеры для организации оптимального горения и устранения дефектов конструкции и процесса.

§ 2. ФОРСАЖНЫЕ КАМЕРЫ ТРДФ

Функции форсажной камеры в системе ТРДФ весьма ограничены, режим работы — кратковременный с минимальным коэффициентом избытка воздуха ($\sim 0,9-1,05$). Это обстоятельство в сочетании с благоприятными условиями в камере для организации горения ($T_0^* > 600$ К) оказало влияние на ее конструкцию. Конструкции камер ТРДФ практически идентичны и просты. На рис. 10 представлена наиболее распространенная конст-

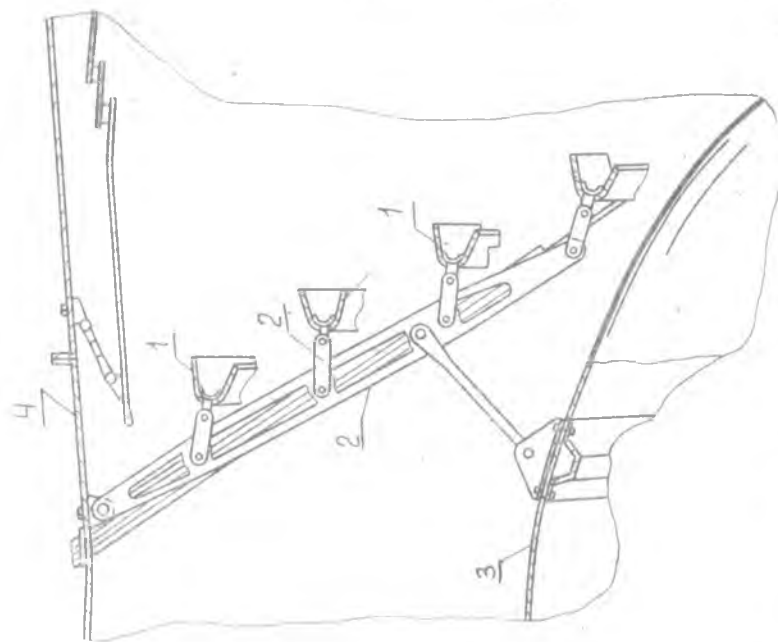


Рис. 10. Форсажная камера: 1 — стабилизаторы; 2 — детали крепления стабилизаторов; 3 — стекатель; 4 — корпус камеры

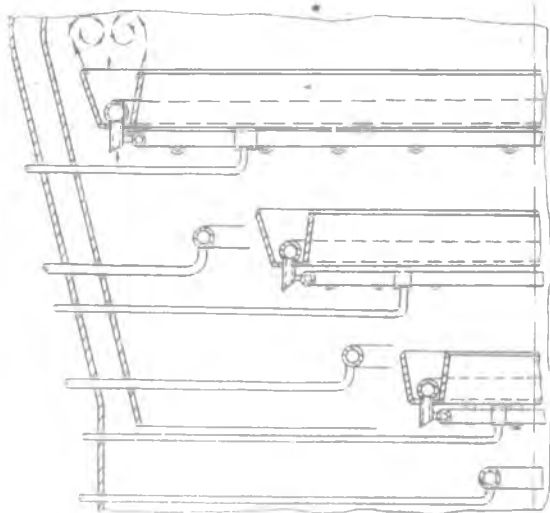


Рис. 11. Форсажная камера

рукция камер. Фронтное устройство камер ТРДФ состоит из стабилизаторов V-образного профиля. Число стабилизаторов определяется потребной степенью форсирования и диаметром камеры. Величина степени форсирования $\bar{p} \leq 1,2$ может быть получена при стабилизации горения одним стабилизатором.

С целью уменьшения гидравлических потерь на обтекание фронтного устройства стабилизаторы смещаются относительно друг друга на расстояние, равное ~ 2 высотам основания стабилизатора, что приводит к уменьшению скорости обтекающего их потока.

Расположение стабилизаторов в пространстве камеры может быть различным (рис. 11), оно зависит от конструктивных особенностей силовой схемы их крепления.

Топливные коллекторы могут располагаться:

- концентрично и соосно со стабилизаторами;
- в виде радиальных стоек.

С целью уменьшения удельного расхода топлива на бесфорсажном режиме разработаны конструкции камер с изменяемой геометрией стабилизаторов пламени, что позволяет снизить гидравлические потери. Изменение геометрии стабилизаторов осуществляется изменением формы (угла раскрытия) стабилизатора. Влияние формы стабилизатора пламени на потери давления в зависимости от загромождения ими камеры показано на рис. 5.

Уменьшить гидравлические потери в камере можно выведением стабилизаторов из потока газа.

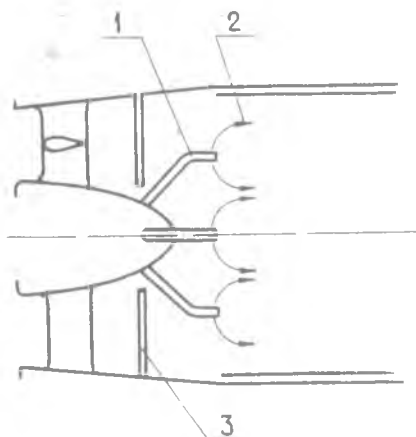


Рис. 12. Камера с газодинамической стабилизацией пламени: 1 — воздушные форсунки; 2 — струи воздуха; 3 — топливные коллекторы

Другим направлением уменьшения гидравлических потерь в камере является газодинамическая стабилизация. На рис. 12 показан пример камеры с газодинамической стабилизацией: 2—2,5 % сжатого воздуха из компрессора подается поперек потока через отдельные форсунки.

В камере с неизменным положением механических стабилизаторов уменьшение гидравлических потерь достигается применением каталитического стабилизатора поверхностного горения в виде кольцевого хонейкомба.

§ 3. ФОРСАЖНЫЕ КАМЕРЫ ТРДДФ

Использование потоков I и II контуров в горении выдвигает проблемы, существенно отличающиеся от тех, которые возникают при сжигании топлива в горячем газе ($T_r > 800$ К) ТРДФ.

Низкая температура газов (≤ 500 К) после вентилятора отрицательно влияет на стабилизацию пламени и его распространение в потоке смеси. Отсутствие испарения топлива при низких температурах ухудшает его распределение в потоке воздуха вследствие агломерации капель. Проблема горения усложняется еще и вследствие плохого испарения топлива на больших высотах. Горение топлива в таких условиях может сопровождаться низкочастотными пульсациями давления воздуха. Эти пульсации воздуха в неблагоприятных ситуациях способны привести к срыву течения воздуха в вентиляторе и помпажу двигателя.

Выполнение требований к воспламенению топлива и плавному регулированию тяги выдвигают условия стабильного горения от $\alpha = 40$ до $\alpha = 1,1$, что существенно превышает диапазон состава смеси, в котором воспламеняется керосин. Это привело к тому, что топливная система форсажных камер ТРДДФ оказалась локализованной по времени и пространству. По меньшей мере, необходимы две отдельные зоны: для воспламенения и формирования тяги малых величин; для сжигания топлива при низком коэффициенте избытка воздуха. Число зон горения определяется требованиями полета. Чтобы удовлетворить эксплуатационные требования к современной форсажной камере ТРДДФ, необходимо создание пяти и более раздельных зон подачи топлива (горения).

Для исключения отрицательного влияния на устойчивость компрессора горение в этих зонах должно быть плавным и стабильным во всем диапазоне расходов топлива.

К форсажным камерам двигателей, предназначенным для СПС, предъявляются требования по обеспечению значения полноты сгорания 96—99% в диапазоне $\alpha = 1,7—6$ и удовлетворению ограничений на уровень содержания вредных примесей в выхлопных газах — не более: NO_x — 1, CO — 3,0 г/кг; несгоревших углеводородов — 2,5 г/кг израсходованного топлива.

Применение ТРДДФ на самолетах с режимами длительного полета без форсажа требует высокой экономичности его работы. Возникает необходимость эффективного смешения потоков I и II контуров путем установки в камере различных смесительных устройств.

Конструирование форсажных камер для ТРДДФ возможно в направлении использования конструкции камер ТРДФ и ПВРД и создания новых схем.

Рассмотрим типичные схемы форсажных камер ТРДДФ.

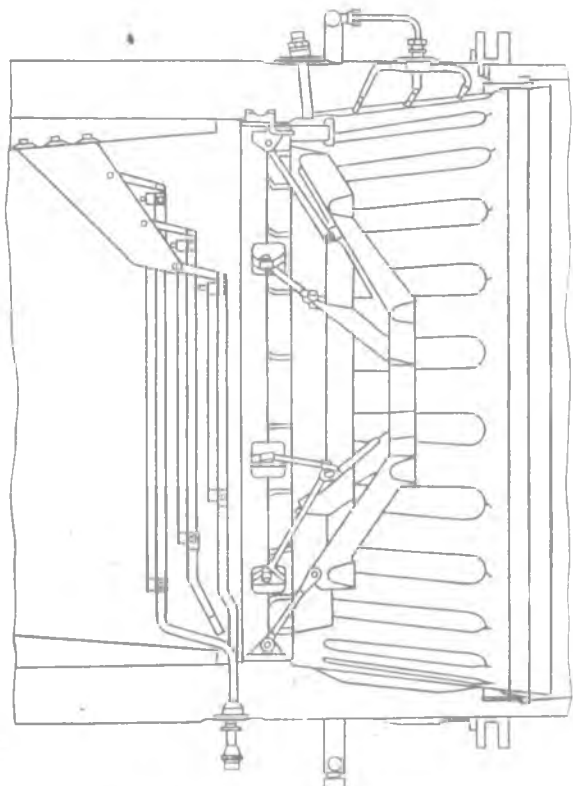


Рис. 13. Форсажная камера

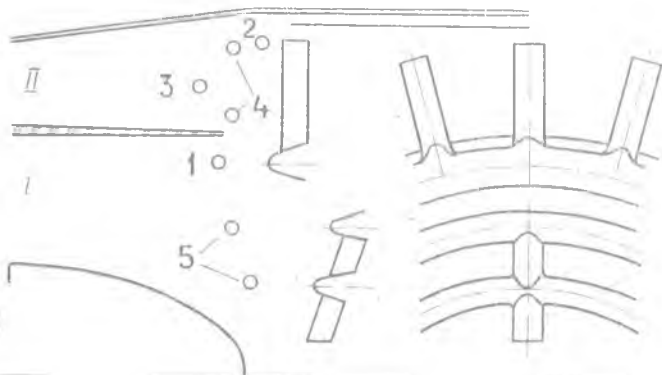


Рис. 14. Форсажная камера без смешения потоков:
1—5 — топливные контуры

Камера А (см. рис. 11). Камера сгорания разработана на базе камеры ТРДФ с использованием фронтového устройства (стабилизаторов), топливной системы и розжига — каталитического воспламенителя. Для исключения отрицательного влияния холодного воздуха II контура на процесс горения он перемещается струйным смесителем с горячим затурбинным газом.

Фронтное устройство камеры — V-образные стабилизаторы с карбюраторами.

Основная часть топлива распыливается между стабилизаторами.

Камера Б (рис. 13). Конструкция камеры разработана с целью уменьшения длины двигателя. Достигнуто это расположением струйного смесителя за фронтным устройством, которое вследствие этого работает в потоке горячего газа I контура.

В потоке воздуха II контура, втекающего в зону горения, топливо распыливается через форсунки, расположенные в окнах диафрагмы.

Розжиг камеры — факельный.

Камера В (см. рис. 10). Это камера сгорания без смешения потоков для двигателя с $m \leq 0,4$. Ее конструкция аналогична камере ТРДФ, содержит кольцевые стабилизаторы. Стабилизатор, расположенный в холодном потоке воздуха, втекающем в камеру из II контура, для повышения устойчивости горения газодинамически связан со стабилизатором, расположенным в горячем газе.

Камера Г (рис. 14). Камера без смешения потоков для двигателя с $m = 0,9-1,1$.

Фронтное устройство — кольцевые стабилизаторы в потоке горячего газа.

В потоке холодного воздуха из II контура пламя стабилизируется радиальными стабилизаторами, соединенными с кольцевыми, расположенными в I контуре. Такое соединение стабилизаторов обеспечивает перевод части горячего газа из I контура во II.

Топливная система имеет несколько контуров с расходными клапанами, так что требуемые коллекторы могут функционировать одновременно, благодаря чему имеется возможность получить желаемый профиль температуры газа на срезе сопла и, следовательно, достичь высокого к.п.д. цикла.

Топливные коллекторы — по типу струйных, розжиг — факельный.

Камера Д (рис. 15). Конструкция камеры разработана для повышения устойчивости процесса горения при низких давлениях ($< 0,8 \text{ кг/см}^2$) и температурах ($< 400 \text{ К}$) воздуха II контура. Ее следует рассматривать как улучшенную конструкцию

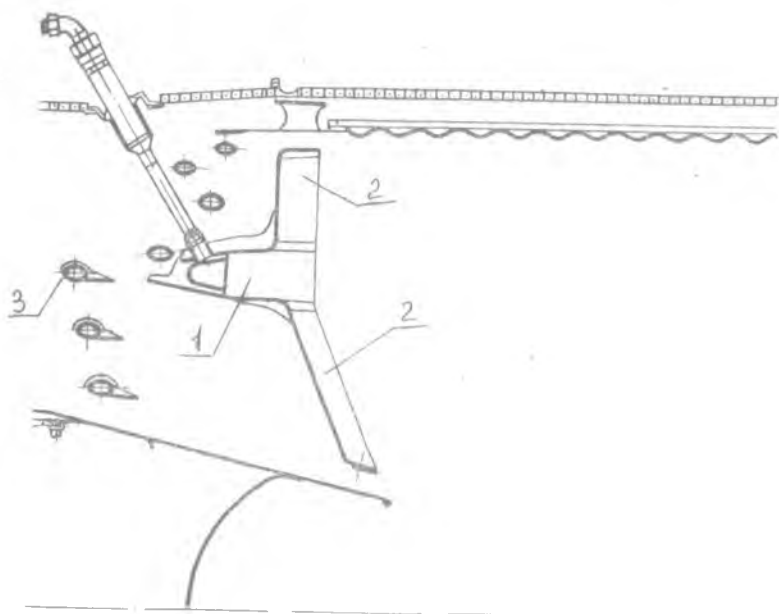


Рис. 15. Форкамера с V-образными радиальными стабилизаторами:
 1 — форкамера; 2 — стабилизаторы; 3 — топливные коллекторы

камеры Г (см. рис. 14). Вместо простых V-образных стабилизаторов в ней применена форкамера с радиальными стабилизаторами. Полная устойчивость горения в форкамере достигается расположением ее в потоке горячего газа I контура и применением коллекторов изменяемой геометрии, что обеспечивает сохранение оптимального распределения топлива по сечению камеры и качественный распыл.

Розжиг камеры производится свечой, расположенной в зоне циркуляции форкамеры. Конструкция форкамеры и ее расположение вблизи разделителя контуров исключает возможность применения факельного зажигания.

Камера Е (рис. 16). Камера предназначена для двигателей большой степени двухконтурности (1,5—2). Устойчивость горения достигается применением лепесткового смесителя и расположением радиальных стабилизаторов соосно с каналами смесителя для горячего газа из I контура. Для расширения пределов горения все радиальные стабилизаторы газодинамически соединены с кольцевым стабилизатором, расположенным в горячем газе I контура.

Топливная система камеры — радиальные форсуночные стой-

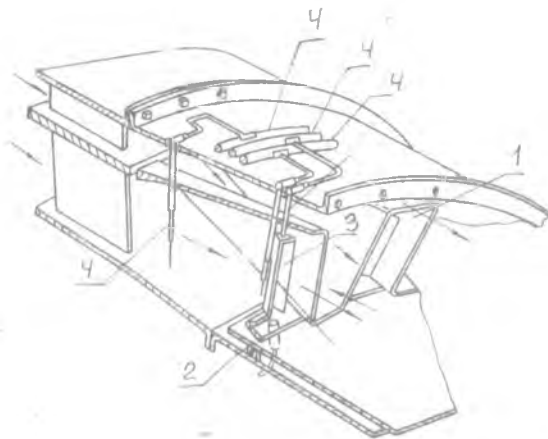


Рис. 16. Форсажная камера двигателя с $m \geq 1,5$:
1 — смеситель; 2 — кольцевой стабилизатор; 3 — радиальный стабилизатор; 4 — топливные коллекторы

ки, распыливающие часть топлива в зоне циркуляции, а другую часть — перед стабилизаторами. Перед ними оно распыливается в холодном и горячем потоках газа.

Розжиг камеры — факельный. Вначале воспламеняется топливо за кольцевым стабилизатором, а от него — за радиальными стабилизаторами.

§ 4. ВИХРЕВЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Для создания больших объемных теплонапряженностей в камерах сгорания применяется турбулентное перемешивание топлива, воздуха и продуктов горения. Однако этот процесс в отдельных местах камеры происходит недостаточно эффективно, в результате некоторая часть топлива выносится из зоны реакции до завершения полного перемешивания с достаточным количеством воздуха или до того как пламя распространится через эту зону. Максимальная скорость тепловыделения достигается в камере, в которой роль процессов теплопередачи и диффузии сведена к минимуму.

В табл. 2 показана потенциальная возможность совершенствования камеры сгорания в целях повышения скорости тепловыделения.

Применяемое в современных камерах сгорания аэродинамическое перемешивание путем вдува струй, установки турбулизаторов в виде реданов, плохообтекаемых тел и т. д. ограничивает степень приближения реакции к налагаемому кинетикой пределу идеального горения.

Таблица 2

Система сгорания	Объемная скорость тепловыделения, ккал/м ³ ·ч
Ламинарное пламя, стехиометрическая пропано-воздушная смесь	$3,56 \cdot 10^9$
Гомогенный реактор, перемешанная стехиометрическая смесь	$2,67 \cdot 10^9$
Камера сгорания	порядка 10^7

Для традиционных схем форсажных камер, камер ПВРД распространение пламени описывается выражениями, соответствующими двум механизмам распространения пламени — ламинарному и турбулентному.

Исследования процесса горения в поле центробежных сил показали возможность реализации третьего механизма — движения объемов сгорающей смеси через свежую топливо-воздушную смесь. Скорость движения (воспламенения) пропорциональна ускоренно:

$$V \sim \sqrt{j}.$$

Поле центробежных сил оказывает значительное интенсифицирующее влияние на процесс горения. Благодаря этим силам скорость горения может в четыре и более раз превысить скорость турбулентного горения. Объясняется это значительным превышением скорости распространения объемов горения, инициирующих воспламенение смеси по сравнению с турбулентным распространением пламени. На рис. 17 показано влияние угла

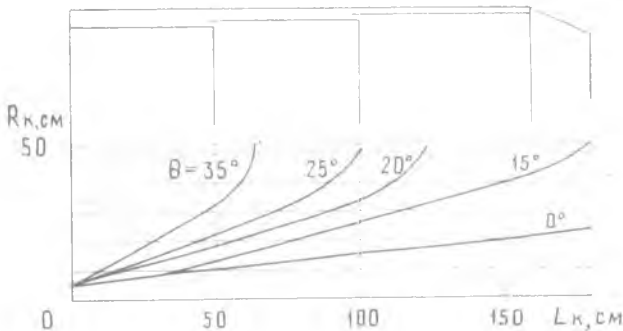


Рис. 17. Влияние угла закрутки потока на угол наклона фронта пламени: 1 — плоскость закрутки потока; 2 — выходное сечение камеры

закрутки потока на угол наклона фронта пламени, характеризующего скорость распространения пламени:

$$U_T \sim U_H \cos \Theta.$$

Из графика следует, что угол наклона фронта пламени в закрученном потоке превышает угол наклона фронта пламени в обычной форсажной камере. Результатом возрастания угла наклона фронта пламени является сокращение длины форсажной камеры или увеличение коэффициента полноты сгорания.

Дополнительное преимущество горения в закрученном потоке заключается в том, что его характеристики не зависят от изменения давления и скорости воздуха.

На основе принципа закрутки потока разработан ряд конструкций форсажных камер, получивших название вихревых. Конструктивно их можно разделить на две группы: с локальной закруткой потока для создания центростремительного потока; с закруткой всего потока на входе в камеру.

Камера А (рис. 18). Отличительный принцип организации горения в этой камере — закрутка потоков I и II контуров (II

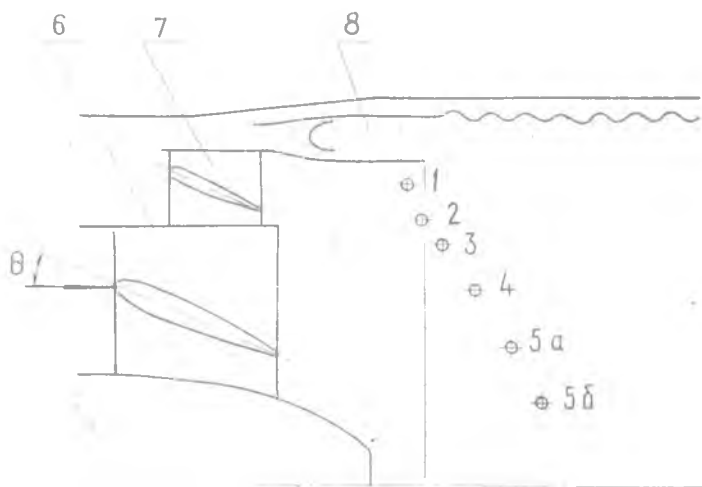


Рис. 18. Вихревая форсажная камера сгорания: 1, 2, 3, 4, 5, а; 5, б — топливные коллекторы; 6 — закручивающий аппарат I контура; 7 — закручивающий аппарат II контура; 8 — форкамера

контура полностью или частично) перед входом в камеру. Для закрутки потоков на входе в камеру устанавливаются лопатки. Возможна закрутка потока I контура, путем сохранения остаточ-

ного угла ($\geq 20^\circ$) течения газа после турбины или придания потоку такого движения.

Вместо обычных стабилизаторов пламени на периферии камеры устанавливают вспомогательную кольцевую форкамеру, которая непрерывно работает на всех режимах форсажа. Ее назначение — стабилизировать горение в камере.

Топливо подается в закрученный поток воздуха и газа из концентрично расположенных коллекторов непосредственно за закручивающими лопатками. Закрученный поток воздуха II контура, смешанный с топливом, отбрасывается центробежными силами на периферию, где смешивается с газами из форкамеры, температура которых равна 2000 К. Воспламененная смесь направляется в сторону оси камеры и в свою очередь смешивается с закрученным потоком топливно-воздушной смеси I контура. Фронт пламени в результате такого течения приобретает форму конуса с вершиной, расположенной в сторону турбины.

Придание потокам I и II контуров вращательного движения обеспечивает перемешивание и сгорание топлива в потоках газов без стабилизаторов пламени. Таким образом может быть достигнуто снижение гидравлических потерь (к примеру до 0,6—1%). Более низкие, чем в камере с V-образными стабилизаторами, гидравлические потери компенсируют потерю тяги вследствие истечения из сопла газа в направлении, отличном от осевого.

Эффективность процесса горения в вихревой камере находится на одном уровне с обычной камерой сгорания (рис. 19).

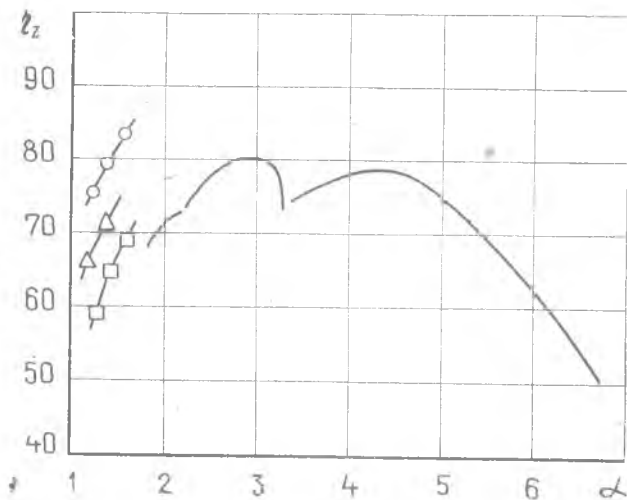


Рис. 19. Полнота сгорания в вихревой камере;
○, △, □ — варианты включения топливных коллекторов

Вместе с тем, на режиме максимальной тяги вихревая камера может работать устойчиво, если предельные значения коэффициента избытка топлива на 10% больше, чем в камере с V-образными стабилизаторами или форкамерой. Это обеспечивает увеличение максимальной тяги на 5%. Другим положительным качеством по сравнению с камерами традиционной схемы является расширение диапазона горения в область бедных смесей,

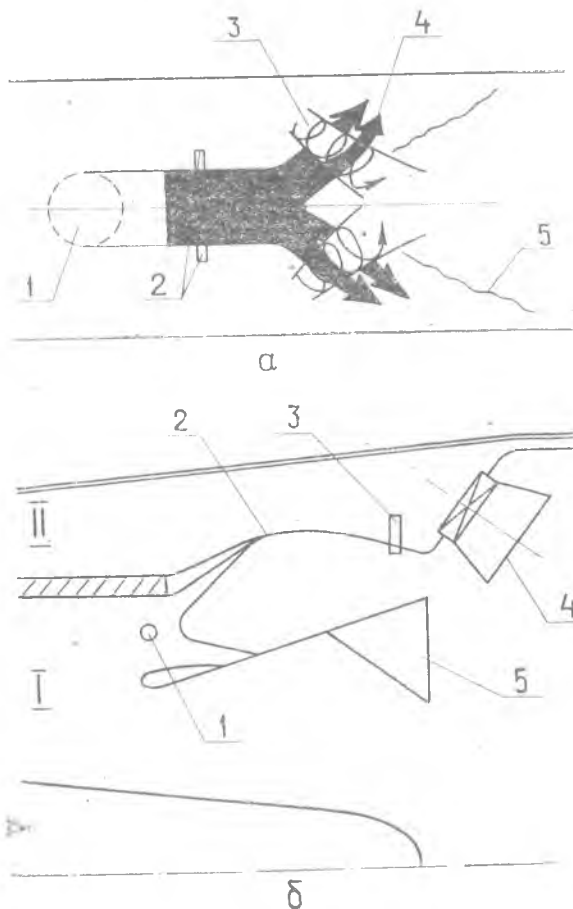


Рис. 20. Вихревая форсажная камера: а — схема течения: 1 — форкамера; 2 — впрыск топлива; 3 — закрученные струи воздуха; 4 — продукты сгорания; 5 — фронт пламени; б — конструктивная схема камеры: 1 — топливный коллектор форкамеры; 2 — форкамеры; 3 — основной топливный коллектор; 4 — завихрители воздуха; 5 — лепестковый смеситель

когда пределы горения зависят от пределов горения форкамеры.

Для расширения пределов горения предлагается перепуск части газа из газогенератора на вход в форкамеру с целью подогрева газов. Эта же цель может быть достигнута подогревом топлива в каналах кольцевой стенки форкамеры перед подачей его в зону горения.

Камера сгорания может быть выполнена частично вихревой, с закруткой потока в I контуре, и полностью вихревой.

Воздействие на длину камеры (при заданном значении η_2) или на полноту сгорания в вихревой камере осуществляется путем изменения угла закрутки потока.

Камера Б. Взаимодействие между вытекающим из пусковой камеры высокотемпературным газом и системой сильно закрученных струй воздуха, приводящее к быстрому смешению и сгоранию топлива, составляет основную идею конструкции этой камеры.

На рис. 20 показана принципиальная схема форсажной камеры. Высокотемпературный газ, обогащенный топливом, взаимодействует с каждой из закрученных струй, так что плотная среда с большим моментом количества движения располагается радиально внутри более горячей и менее плотной среды, имеющей меньший момент количества его движения. В результате этого движение горячих обогащенных топливом газов ускоряется по направлению к центру закрученных струй, что обуславливает высокую степень смешения, и горение происходит спирально и плаучести газов, в то время как агломераты под действием центробежных сил отбрасываются в окружающую смесь.

На рис. 20 и 21 показаны конструкции камер, реализующих описанный принцип. Воздух для пусковой камеры (в количестве 20%) отбирается из потока горячего газа I контура. Топливо

для сжигания в пусковой камере распыливается форсункой 7 перед стабилизатором 6. Топливо, необходимое для изменения тяги, подается через форсунки в высокотемпературный газ вблизи выхода из пусковой камеры. В камеру воздух поступает через генераторы вихрей 4.

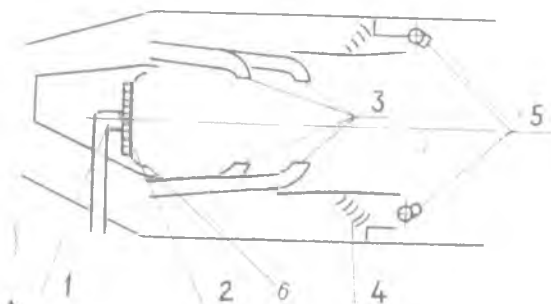


Рис. 21. Форсажная камера II контура: 1 — форсунка; 2 — фронтное устройство; 3 — патрубки для воздуха; 4 — генераторы вихрей; 5 — форсунки дополнительного впрыска; 6 — стабилизатор

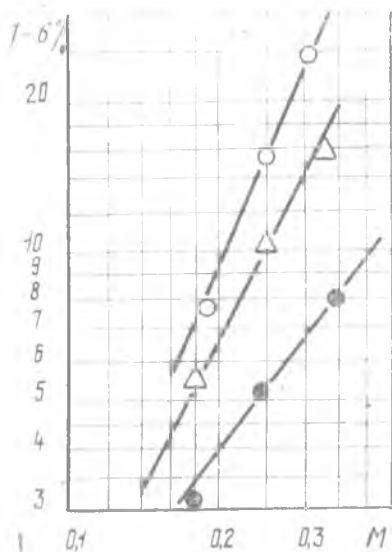


Рис. 22. Влияние закрутки потока на потери давления в камере ●, △, ○ — закрутка потока 30, 45, 60°.

Направление вращения вихрей выбрано так, чтобы не индуцировать их в потоке. На рис. 22 показаны потери давления в камере в зависимости от угла установки лопаток генераторов вихрей, на рис. 23 — коэффициент полноты сгорания этой камеры.

Конструкция камеры с по-

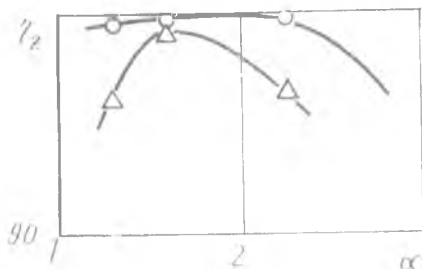


Рис. 23. Влияние закрутки потока на полноту сгорания: ○, △ — закрутка потока 60, 45°.

дочей воздуха только II контура в виде закрученных струй показана на рис. 20,б.

Воспламенение смеси в I контуре осуществляется от пламени пусковой камеры.

§ 5. ФОРСАЖНЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ II КОНТУРА ТРДДФ

Организация горения во II контуре ТРДДФ в зависимости от назначения двигателя может осуществляться несколькими способами. На рис. 21, 24 показаны схемы организации горения — ввода топлива и воздуха в камеру. В зависимости от требований к характеристикам камеры предлагаются следующие способы сжигания топлива:

1. Все топливо вводится в первую ступень — получается минимальный объем камеры сгорания для данного состава и конечного значения η_z .

2. Для камер, работающих на смеси с α_z беднее стехиометрии, минимальный объем достигается тогда, когда весь процесс завершается при $\alpha=1$, а затем уже добавляется избыточный воздух.

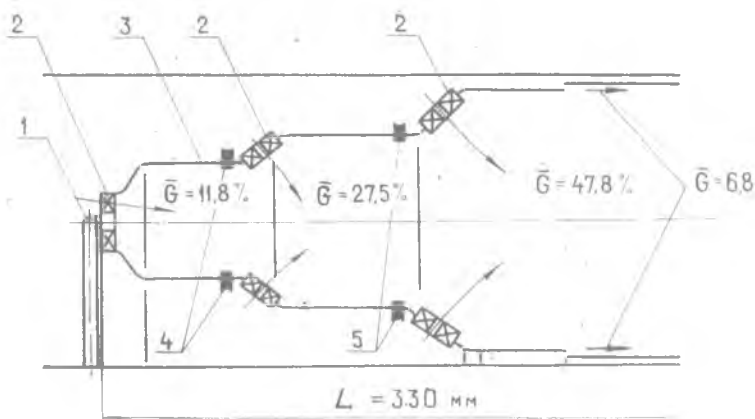


Рис. 24. Форсажная камера II контура: 1 — форсунка; 2 — завихритель; 3 — форкамера; 4, 5 — форсунки дополнительного впрыска

3. В тех случаях, когда требуется высокая полнота сгорания, целесообразно организовывать ступенчатый процесс горения. Состав смеси в ступенях может быть различным.

Для организации горения в потоке воздуха II контура ТРДДФ предлагается несколько конструкций, способных надежно стабилизировать пламя в холодном воздухе. Первая конструкция выполнена в виде форкамеры, в которой процесс горения с точки зрения стабилизации пламени и полноты сгорания протекает в оптимальных условиях. Это достигается скоростью течения воздуха в форкамере, чем удовлетворяется условие (1), и практически полной изоляцией зоны горения от подмешивания холодного воздуха стенками форкамеры. Режим горения с $\alpha = 0,9 - 1$ в сочетании с отмеченными факторами позволяет получать коэффициент полноты сгорания $0,9 - 0,95$, что обеспечивает температуру струй пламени $T_{\Gamma}^* \geq 1550$ К. Исследованиями установлено, что эта температура позволяет надежно стабилизировать горение в потоке смеси с параметрами: температура смеси ≥ 300 К, скорость — до 300 м/с. Повышению устойчивости воспламенения топливо-воздушной смеси, обтекающей форкамеру, способствует размещение в плоскости выходного сечения патрубков V-образных стабилизаторов, в зону циркуляции за которыми впрыскивается топливо и тангенциально вводится воздух. Конструкция форкамеры может быть различной.

С целью расширения пределов горения в сторону бедных составов смеси ($\alpha > 3$) разработаны камеры, по конструкции аналогичные основным камерам сгорания (рис. 20, 24).

Для повышения устойчивости горения в первичную часть может подаваться горячий воздух из-за компрессора высокого давления.

Форсажная камера, целесообразная для ТРДДФ СПС (см. рис. 24), состоит из трех элементов — предкамеры, пусковой и основной ступеней.

Для улучшения процесса смешения воздух в камеру подается через завихрители 2 в виде закрученных струй, которые взаимодействуют с потоком высокотемпературного газа вспомогательной горелки. Поверхность раздела двух потоков (холодного воздуха и горячего газа) неустойчива к действию центробежных сил. Поэтому высокая скорость перемешивания создается не только из-за сил сдвига, возникающих вследствие относительного движения на поверхности раздела, но и потому, что из-за поверхностной неустойчивости течения моли воздуха из закрученных струй под действием центробежных сил внедряются в окружающую их смесь.

С целью изменения тяги топливо подается в высокотемпературный газ на границе между предкамерой и пусковой ступенью, пусковой и основной ступенями; в результате уменьшается чувствительность горения к снижению температуры на входе в камеру.

Распределение воздуха по длине камеры следующее: в предкамеру подается 12, в пусковую ступень—27, в основную—48% полного расхода воздуха через II контур. Остальная часть воздуха направляется на охлаждение жаровой трубы и деталей реактивного сопла. По коэффициенту полноты сгорания эффективность горения в камерах такой конструкции достигает 99—99,9% при величине гидравлических потерь 4,5%.

§ 6. ФОРСАЖНАЯ КАМЕРА ДЛЯ СВВП

Форсирование тяги ТРДД, применяемого на самолетах вертикального взлета и посадки (СВВП), осуществляется путем сжигания топлива в патрубках поворотных сопел II контура. В этом случае требуется обеспечить устойчивое и полное сгорание топлива в небольших по объему патрубках, имеющих сложную конфигурацию. Решение этих про-

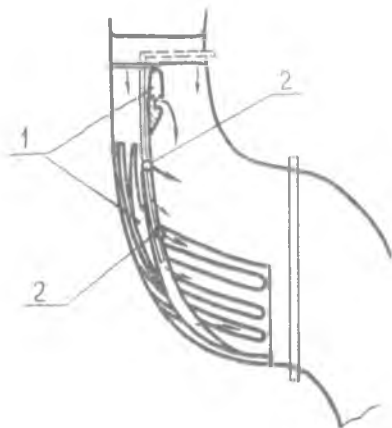


Рис. 25. Форсажная камера ТРДДФ для СВВП: 1 — стабилизатор; 2 — форсунки

блем несколько упрощается из-за сравнительно невысоких температур форсажа (1200 К) при степени форсирования 35%. Конструкция фронтального устройства представляет собой решетку сложной пространственной конфигурации из V-образных стабилизаторов.

Подача топлива — двухступенчатая. I ступень подает топливо в первичную часть, II ступень — ниже по потоку в зону горения I ступени.

В другой конструкции (рис. 25) для стабилизации пламени применяется нишевый стабилизатор, а также трехступенчатая подача топлива, рассредоточенная по длине зоны горения камеры.

§ 7. КАМЕРА СГОРАНИЯ ПВРД

Принципиальная схема камер сгорания ПВРД весьма проста и тождественна форсажным камерам. Многие элементы современных форсажных камер ТРДДФ заимствованы из камер ПВРД.

На рис. 3,а показаны камеры ПВРД для дозвуковых, малых сверхзвуковых скоростей $M_n < 1,5 - 2$, умеренных сверхзвуковых скоростей (рис. 3,б) $M_n < 5 - 7$ и для больших сверхзвуковых скоростей $M_n > 5 - 7$ (рис. 3,в). Последний двигатель называется: гиперзвуковой прямоточный (ГПВРД).

Для стабилизации пламени в камерах ПВРД применяются кольцевые и радиальные стабилизаторы, сочетание кольцевых и радиальных стабилизаторов и форкамеры (см. рис. 13). С целью уменьшения гидравлических потерь применяются и газодинамические стабилизаторы.

Форма стабилизатора (кольцевая или радиальная) в условиях камер ПВРД может оказывать влияние на полноту сгорания и диапазон горения.

В случае радиальных стабилизаторов полнота сгорания уменьшается при уменьшении α . В случае кольцевых стабилизаторов η_c менее чувствителен к составу смеси и изменению длины камеры, но значительно зависит от температуры воздуха. В связи с этим целесообразно использовать комбинированный стабилизатор, сочетающий элементы двух рассмотренных. Этот подход аналогичен решению проблемы горения в ТРДДФ.

Для повышения полноты сгорания при полете на больших высотах над землей, где трудно обеспечить хорошее смесеобразование в камере, в ней устанавливают генератор вихрей или завихрители потока. При обтекании генераторов вихрей потоком в камере образуются вихри, интенсифицирующие смесеобразование и улучшающие полноту сгорания.

В полете угол атаки вихревых генераторов может регулироваться с помощью автомата.

Интенсификация процессов смешения и горения достигается также путем турбулизации потока при вдуве в него струй воздуха по нормали или под углом к потоку перед зоной горения.

Смесеобразование в камерах ПВРД осуществляется так же, как и в форсажных камерах.

Камера сгорания ГПВРД отличается от камер ПВРД и СПВРД. В ней отсутствует фронтное устройство, поскольку при скорости в камере $M > 1$ оно приводит к образованию скачков уплотнения и большим потерям полного давления. Камера представляет собой свободный канал. Топливо подается в центр канала со стенок камеры. Для уменьшения возмущений подача топлива рассредоточивается по длине и сечению камеры. При числах $M_n = 4—6$ во избежание «запираания» необходимо равномерное тепловыделение по длине камеры. При числах $M_n = 8—10$ и более следует обеспечить быстрый (концентрированный) подвод тепла. Поэтому при небольших гиперзвуковых числах M_n около 70% всего расхода топлива подается параллельно оси камеры через форсунки, установленные в стойках на входе в камеру, а 30% топлива поступает по нормали к оси камеры через форсунки на ее стенках.

При высоких числах M_n все топливо распыливается через вторые форсунки.

Воспламенение смеси в камере ГПВРД осуществляется высокой температурой воздуха в скачках уплотнения, которая может достигать в зависимости от числа M_n полета 2000—2500 К. Возможно применение специальных горелок для образования дежурного пламени, имеющего высокую температуру с образованием свободных радикалов, которые ускоряют воспламенение.

Воспламенительные устройства устанавливаются между форсунками вблизи точки присоединения скачка, где качество смеси близко к стехиометрическому. Кроме того, в зоне циркуляции, где в смеси наблюдается переобогащение горючего, необходимо располагать форсунки кислорода для подачи его к воспламенительным устройствам. Для улучшения воспламенения топлива вводятся присадки самовоспламеняющихся компонентов: триэтилалюминия, пентаборана и т. д.

Процесс сгорания топлива в камере ГПВРД может осуществляться также с использованием детонационного горения. Резкий подъем давления и температуры в скачке ускоряет воспламенение и сгорание топлива.

Защита корпусов камеры от высоких температур осуществляется установкой экранов, на охлаждение которых использует

ся часть воздуха. Конструкция экранов аналогична экранам форсажных камер.

В ГПВРД для охлаждения стенок камеры используется горячее или они защищаются с помощью наносимых на стенку специальных теплозащитных материалов малой теплопроводности.

В качестве горючего в камерах ПВРД применяются углеводороды, бороводородное топливо и водород, который начинает применяться в ГПВРД.

§ 8. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ

Процесс, протекающий в форсажной камере и камере ПВРД, условно можно разделить на ряд составляющих процессов, требующих для своего осуществления различные устройства (узлы).

В табл. 3 перечислены узлы форсажной камеры и соответствующие процессы, формируемые этими узлами.

Таблица 3

Конструкция, осуществляющая данный процесс	Процесс
Диффузор	Уменьшение скорости газа на входе в камеру
Смеситель	Смещение потоков I и II контуров в ТРДДФ
Коллектор, форсунки	Распыливание топлива
Свеча, факел из ОКС и т. д.	Зажигание смеси
V-образный профиль, форкамера и т. д.	Стабилизация пламени
Тепловые и акустические экраны	Защита корпуса камеры от нагрева

Диффузор

Диффузор служит для уменьшения скорости потока W_0 на входе в камеру сгорания. На него приходится значительные потери полного давления (40—50%) от общих потерь в камере.

Газы, выходящие из турбины, обычно имеют крутку, и профиль их скорости неравномерен. Оба эти эффекта в большей или меньшей степени существуют, и если проектируется опти-

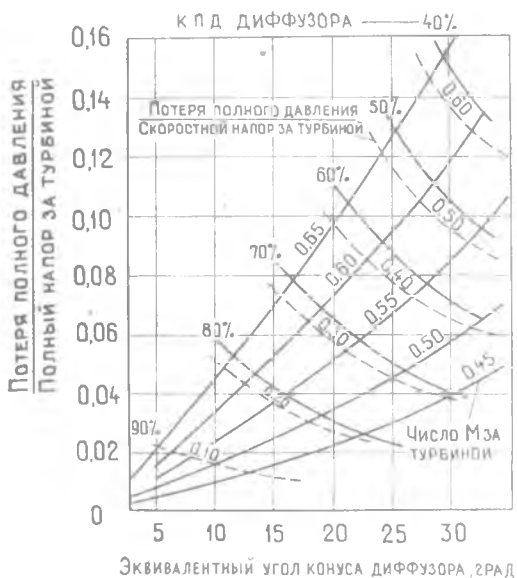


Рис. 26. Характеристика диффузора форсажной камеры

мальный диффузор, то должно быть известно их влияние на характеристику диффузора.

Характеристика приемлемого диффузора представлена на рис. 26. Эквивалентный угол конуса не должен превышать 20° , так как это может вызвать неустойчивость течения газа и большие потери полного давления. Указанные значения можно улучшить, применив направляющие лопатки. Тщательное профилирование кольцевого канала для достижения постоянного градиента давления вдоль тракта $dp/dx = \text{const}$ дает минимальные потери давления.

Смеситель

Смеситель в форсажных камерах ТРДДФ способствует стабилизации пламени в потоке холодного воздуха II контура, увеличивая температуру на входе в камеру, смешивая потоки (при $m < 1$), или локально повышая температуру воздуха перед стабилизатором (при $m \geq 1$). В зависимости от степени двухконтурности и ограничений длины камеры со стороны компоновки двигателя на самолете применяются три типа смесителей (рис. 27).

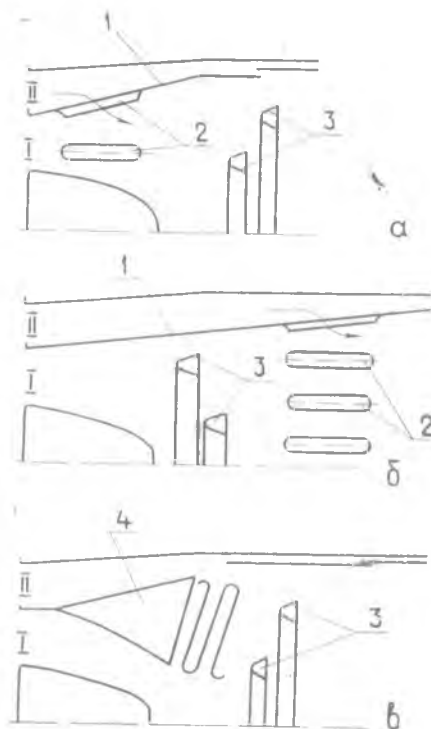


Рис. 27. Основные типы смесителей: 1 — разделитель потоков; 2 — окна в разделителе для потока II контура; 3 — стабилизаторы пламени; 4 — лепестковый смеситель

Вторая функция смесителя в форсажной камере ТРДДФ — повышение экономичности двигателя. Снижение удельного расхода на бесфорсажном режиме может достигать $\sim 2,5$, на форсаже $\sim 4\%$ (при $m = 1$).

Топливная система камеры

Первым процессом, который организуется на начальном участке камеры, является смесеобразование. Его цель — создание горючей смеси. Для этого применяются коллекторы с форсунками.

Топливо может подаваться в поток тангенциально к оси камеры через форсунки коллектора, установленного радиально, или радиально внутрь, или наружу из кольцевого коллектора.

Смеситель 1 (рис. 27,а) выполнен в виде диафрагмы, разделяющей I и II контуры, с окнами овальной формы. Воздух II контура через окна в диафрагме поперечными струями втекает в поток газа I контура (в диафрагме может быть 6—9 окон).

Смеситель 2 (рис. 27,б) применяется с целью сокращения длины форсажной камеры. Окна диафрагмы для истечения воздуха из II контура располагаются над зоной горения за стабилизаторами пламени.

Лепестковый смеситель (рис. 27,в) устанавливается в форсажной камере двигателя со степенью двухконтурности более 1,3. Форма, число и размеры каналов для течения газа могут быть различными и являются объектом изменения при доводке процесса горения в форсажной камере. Требуемые характеристики смесителя подбираются экспериментально.

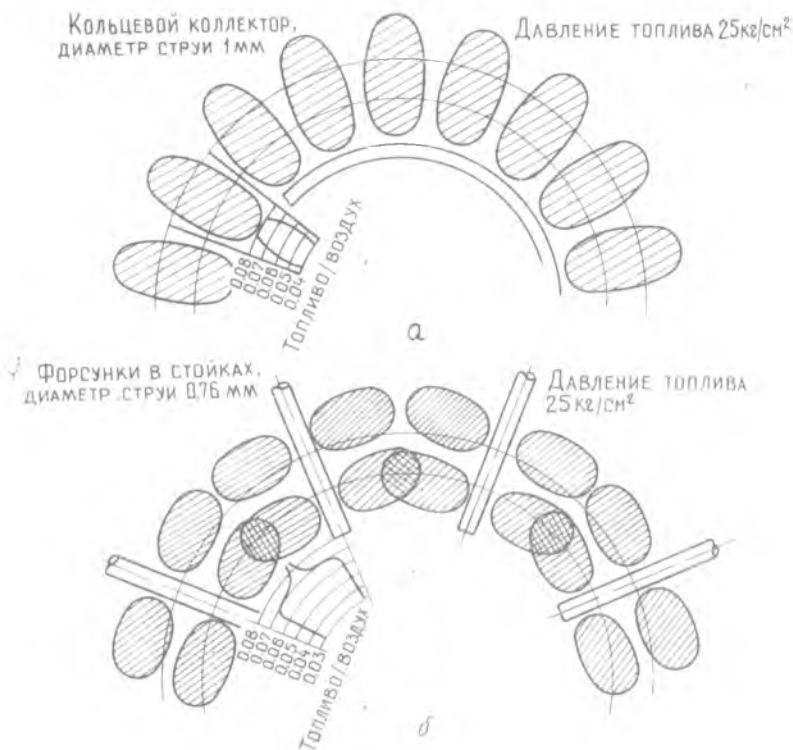


Рис. 28. Сравнение распределений топлива, распыляемого форсунками, расположенными на радиальном (а) и кольцевом (б) коллекторах

На рис. 28 показано в сравнении распределение в пространстве топлива, распыляемого форсунками, расположенными на радиальной стойке и на кольцевом коллекторе.

Топливо по сечению форсажной камеры может распределяться двумя способами: 1 — коллекторы и стабилизаторы располагаются в следе друг за другом, что обеспечивает проходные условия основного потока топлива вблизи стабилизатора. Этот способ нашел применение в однорежимных форсажных камерах с $\alpha_{\min} \sim 1$; 2 — некоторое количество топлива подается местно (за стабилизатор), а остальное — в поток на стабилизатор и между стабилизаторами. Способ применяется для расширения пределов горения в сторону бедных смесей ($\alpha > 5$). При таком способе смесообразования в зоне циркуляции поддерживается горение при постоянном стехиометрическом составе смеси. Топ-

ливо, не нужное для стабилизации пламени, сжигается в зоне распространения пламени. Любое изменение расхода форсажного топлива с целью изменения тяги влияет на зону распространения пламени, но не на зону циркуляции, что обеспечивает широкий диапазон горения по α_2 и его максимальную устойчивость.

Топливо распыляется центробежными форсунками, конструкция которых аналогична форсункам ОКС, или струйными форсунками, выполненными в виде калиброванного отверстия

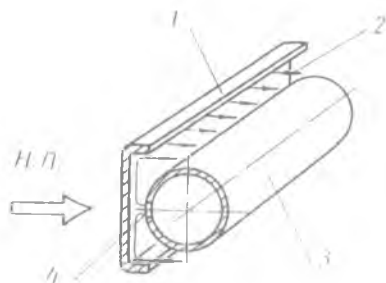


Рис. 29. Струйный топливный коллектор с отбойной пластиной:

1—отбойная пластина; 2—направление течения топлива; 3—топливный коллектор; 4—отверстие в коллекторе; Н.П. — направление движения потока воздуха

в стенке коллектора диаметром 0,5—1 мм. Для повышения равномерности распределения топлива при струйном распыле применяют пластины, которые располагаются перед отверстиями (рис. 29). Струя топлива, ударяясь о пластину, равномерно растекается вдоль нее и поступает в поток. Одновременно пластина, затеняя коллектор, понижает коэффициент теплопередачи от газа к коллектору, а поток испаряющегося топлива снижает температуру газа. Таким образом достигается меньший подогрев топлива в коллекторах.

Таким образом достигается меньший подогрев топлива в коллекторах.

Стабильность локального состава смеси вблизи стабилизатора имеет важное значение для ее воспламенения и горения. Стабильность распределения потока топлива в пространстве может быть достигнута поддержанием постоянной траектории топливных факелов согласно выражению

$$y = \frac{V_0 \sin \frac{\alpha_0}{2}}{k \sqrt{V_0 \sin \frac{\alpha_0}{2} - \frac{1}{\tau}}} \quad (8)$$

где y — ордината;

V_0 — скорость истечения топлива;

τ — время.

Необходимая стабильность может быть достигнута при постоянной скорости истечения топлива из форсунки или постоянном перепаде давления на форсунке:

$$V_0 = \sqrt{2g \frac{\Delta P_T}{\gamma_T}} \quad (9)$$

где ΔP_T — перепад давления топлива;
 γ_T — удельный вес топлива.

Для этого применяют коллекторы с изменяемым проходным сечением сопла форсунки.

В конструкции коллектора (рис. 30) площадь отверстия изменяется в результате движения штифта 2 относительно отверстия 1 при изменении формы коллектора под действием давления.

Конструкция таких коллекторов позволяет распыливать любое количество топлива (включая и максимальный расход) при высоком давлении, к примеру, при $\Delta P = 5-8$ кг/см².

Второе назначение коллекторов с регулируемой геометрией (рис. 31) — это увеличение пропускной способности по сравнению с коллекторами неизменной геометрии. Это качество весьма ценно для камер ТРДДФ, требующих широкого диапазона изменения расхода топлива. Кроме того, это позволяет сократить число коллекторов.

В целях исключения закоксовывания коллекторов в результате крекинга топлива, остающегося в коллекторах после выключения форсажа, топливо удаляют продувкой сжатым воздухом, отбираемым из компрессора.

Удаление остатков топлива из коллекторов после выключения форсажа достигается также путем установки части форсунок соплом навстречу потоку, а других — соплом по потоку.

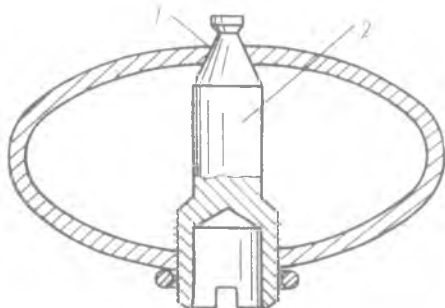


Рис. 30. Топливный коллектор изменяемой геометрии



Рис. 31. Диапазоны изменения расходов топлива форсунки постоянной 1 и изменяемой 2 геометрии

Запальное устройство

Воспламенение топливо-воздушной смеси при включении форсажной камеры может осуществляться: высоковольтной свечой; запальным устройством в виде автономной миниатюрной камеры сгорания; при кратковременном впрыскивании топлива перед турбиной-факелом пламени и каталитическим воспламенителем.

При розжиге свечой ее электрод располагается в зоне циркуляции, стабилизатора или форкамеры, вблизи распыла топлива (форсунки). Запальное устройство в виде автономной камеры подобно устройствам, применяемым в основной камере сгорания. Факел пламени, выбрасываемый из нее, направляется в зону циркуляции. Запальное устройство может располагаться снаружи на корпусе камеры, в потоке газа и внутри затурбинного кока в зависимости от конструкции фронтного устройства.

Факельная система зажигания — наиболее простая, обладает большой тепловой мощностью. Для ее осуществления в конце основной камеры сгорания устанавливается струйную форсунку. Для усиления факела, особенно в многоступенчатых турбинах, на входе в форсажную камеру помещают вторую форсунку, соединенную с первой (рис. 32).

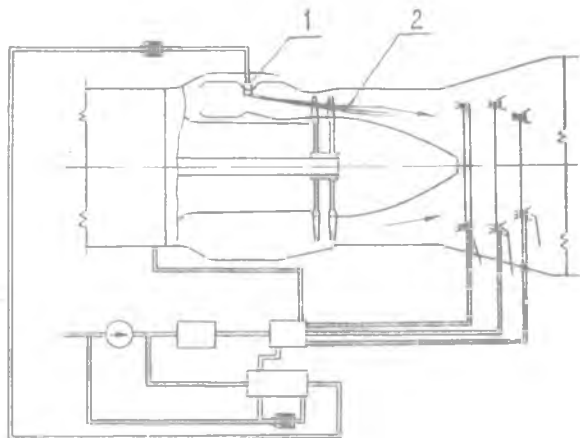


Рис. 32. Факельная система зажигания: 1 — форсунка; 2 — факел пламени

Каталитический воспламенитель представляет собой устройство, заполненное губчатой пластиной, на которое подается топливо. Возможно совмещение этого устройства со стабилизатором пламени (рис. 33). При контакте ТВС с губча-

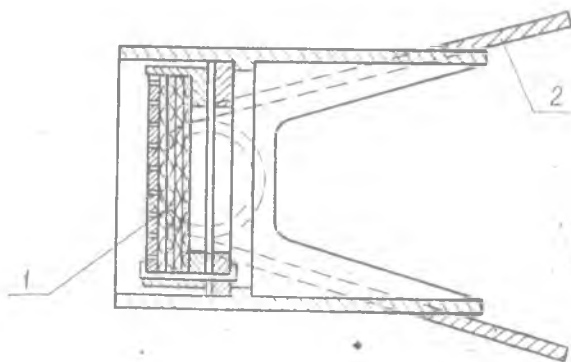


Рис. 33. Каталитический воспламенитель: 1 — катализатор; 2 — стабилизатор пламени

той пластиной, имеющей чрезвычайно развитую поверхность и являющуюся катализатором, происходит воспламенение смеси.

Чтобы обеспечить устойчивый розжиг форсажной камеры, все перечисленные устройства должны удовлетворять условию, сформулированному Я. Б. Зельдовичем: количество тепла, необходимое для воспламенения ТВС, должно быть достаточным для того, чтобы нагреть до температуры горения шаровой объем свежей смеси, радиус которого порядка тепловой ширины зоны горения.

Зависимость количества тепла от условий в зоне воспламенения ТВС описывается уравнением

$$Q = \text{const} \frac{\lambda_r^3 T_0 (T_{\text{ц}}^* - T_0)}{U_{\text{н}}^3 P_0^2 C_p^2} \quad (10)$$

где λ — коэффициент теплопроводности продуктов сгорания при температуре $T_{\text{ц}}$;

$U_{\text{н}}$ — нормальная скорость распространения пламени.

Стабилизаторы пламени

Процесс стабилизации пламени в форсажной камере и камерах ПВРД осуществляется небольшими источниками тепла, которыми являются зоны циркуляции за плохообтекаемыми телами или струи пламени, вытекающие из автономной горелки—форсажной камеры.

Связь пределов стабилизации пламени с параметрами потока и характеристиками стабилизатора C_x, d можно представить в виде зависимости

$$\frac{W_0}{C_s d P^{0,5} T^{1,7}} = f(\alpha), \quad (11)$$

Кроме параметров и характеристик, значения которых приведены в уравнении (11), на пределы стабилизации влияют фазовое состояние ТВС и интенсивность турбулентности.

Влияние фазности ТВС проявляется в смещении пределов горения в сторону более бедных смесей.

Турбулизация потока сужает пределы горения в гомогенных смесях и расширяет их в сторону богатых составов в гетерогенных смесях при введении топлива непосредственно в зону циркуляции. В последнем случае целесообразно повышать уровень турбулентности. Турбулизация может осуществляться установкой на стенках камеры реданов, вдувом поперечных струй воздуха перед стабилизаторами. Такое воздействие на процесс широко используется в камерах ПВРД, работающих при низких давлениях воздуха ($0,2 \text{ кг/см}^2$).

Существенное влияние на пределы горения по скорости W_0 оказывает степень загромождения стабилизаторами сечения камеры. Оптимальная величина ее — $0,25-0,35$.

Для организации устойчивой стабилизации пламени в камерах сгорания ТРДФ, ТРДДФ и ПВРД, параметры потока которых весьма различны и изменяются в широких пределах, разработаны различные конструкции стабилизаторов пламени, которые можно объединить

в следующие группы:
стабилизаторы V-образного профиля;

стабилизаторы удобообтекаемой формы;

каталитические стабилизаторы;

устройства для газодинамической стабилизации пламени;

форкамеры.

Стабилизаторы пламени V-образного профиля. Типичная конструкция стабилизаторов этого типа показана на рис. 34. Стабилизаторы могут быть кольцевыми, радиальными или иметь кольцевую-радиальную форму.

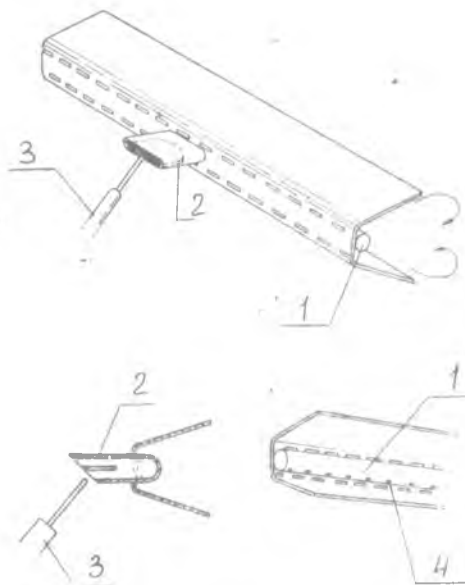


Рис. 34. Стабилизатор с карбюратором

Высота основания стабилизатора, определяющая размеры зоны циркуляции как источника поджигания ТВС, в зависимости от параметров W_0 , T_0 , P_0 , α_{Σ} определяется из выражения (11). Типичное значение высоты — основание 30—50 мм.

Угол раскрытия стабилизатора не влияет на пределы горения в гомогенных смесях. Увеличение его расширяет пределы горения при подаче топлива в зону циркуляции. Типичное значение угла раскрытия стабилизатора составляет 30—45°.

Для обеспечения устойчивой работы форсажной камеры на бедных смесях ($\alpha_{\Sigma} > 3$) применяются стабилизаторы с подачей карбюрированной ТВС в зону циркуляции (см. рис. 34). Внутри такого стабилизатора располагается трубка 1, в которую через заборник 2 поступают воздух и топливо 3. В трубке топливо и воздух перемешиваются, образуемая смесь подогревается и вытекает через отверстия 4 в зону циркуляции.

Стабилизатор пламени может выполнять функции акустического демпфера для подавления колебаний воздуха при вибрационном горении. Известно, что пространство вблизи стабилизаторов является начальным источником неустойчивости. В этом районе выделяется основная тепловая энергия, поэтому можно ожидать, что будут весьма эффективны акустические демпферы, конструктивно объединенные со стабилизатором пламени.

Стабилизаторы пламени удобообтекаемой формы (рис. 35). Эти стабилизаторы широко применяются в камерах сгорания ПВРД. Форма стабилизаторов может быть самой разнообразной: в виде ниш в стенках камеры, концентричного профиля с нишами на боковой поверхности (рис. 35, а), в виде коллектора с обтекателями (рис. 35, б).

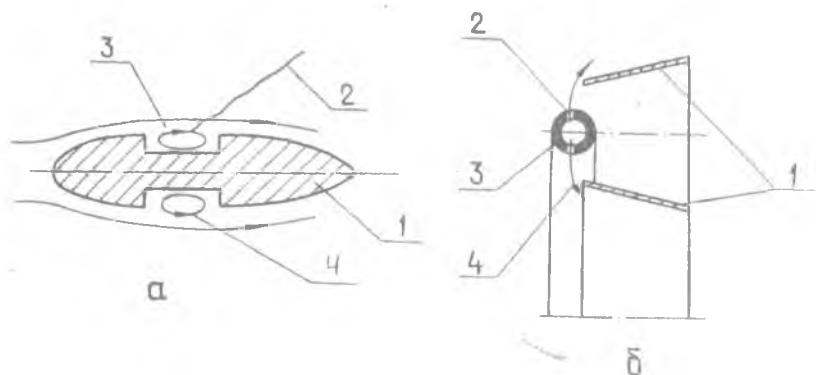


Рис. 35. Стабилизаторы пламени удобообтекаемой формы: а—1 — стабилизатор; 2 — фронт пламени; 3 — ниша; 4 — зона циркуляции; б—1 — кольцевые профили; 2 — отверстия; 3 — трубка; 4 — струи воздуха

разной: в виде ниш в стенках камеры, концентричного профиля с нишами на боковой поверхности (рис. 35, а), в виде коллектора с обтекателями (рис. 35, б).

Очаг горения, образующийся в вихревых зонах ниш, воспламеняет текущую мимо ТВС. Гидравлические потери при установке в камере таких стабилизаторов в 2—3 раза меньше, чем потери, создаваемые V-образным стабилизатором, эквивалентным ему по эффективности.

Каталитические стабилизаторы пламени. Известно несколько конструктивных направлений применения катализаторов для стабилизации пламени. Первое направление — расширение пределов стабилизации пламени по составу смеси, скорости и давлению газа путем покрытия поверхности V-образного стабилизатора катализатором. Если катализатор покрывает и внутреннюю поверхность стабилизатора, то отпадает необходимость в воспламенителе. Высокая активность стабилизатора в сочетании с высокой температурой потока газа и благоприятным составом смеси обеспечивает надежное воспламенение. При этом нерешенной проблемой является создание прочной и надежной связи между покрытием из катализатора и материалом стабилизатора.

Второе направление — снижение гидравлических потерь путем применения стабилизирующего устройства в виде кольцевого хонейкомба из керамического материала, покрытого катализатором. В таком устройстве потери полного давления оказываются меньше, чем у обычных стабилизаторов, имеющих ту же площадь загромождения канала. Это устройство можно назвать стабилизатором поверхностного горения.

Аксимальный размер стабилизатора выбирается из условия обеспечения воспламенения смеси:

$$\tau_{\text{конт}} = \frac{L}{W} \leq \tau_{\text{зад. восп}}, \quad (12)$$

где τ — время;

L — длина катализатора.

Устройства для газодинамической стабилизации пламени. Они предназначены для уменьшения гидравлических потерь в камере на бесфорсажном режиме ее работы с целью уменьшения удельного расхода топлива. Принципиальная схема камеры с газодинамической стабилизацией приведена на рис. 12.

Для образования зоны обратных токов применяется или чистый воздух, или его смесь с топливом. Вытекающий из форсунки воздух, взаимодействуя с потоком, образует зону обратных токов, которая становится источником тепла.

С использованием эффекта образования циркуляционного течения за плоскими струями работают также стабилизаторы, предназначенные для уменьшения гидравлических потерь. В этих конструкциях зона циркуляции образуется за пластинами, установленными под углом 15—20° к потоку при подаче воздуха

из трубки, размещенной между ними; за поперечной плоской струей воздуха, вытекающей из удобообтекаемого профиля.

Эффективность и устойчивость процесса горения в камере с газодинамической стабилизацией зависит от количества воздуха, применяемого для получения циркуляционного течения. С его увеличением η_z и высота работы камеры возрастают (рис. 36).

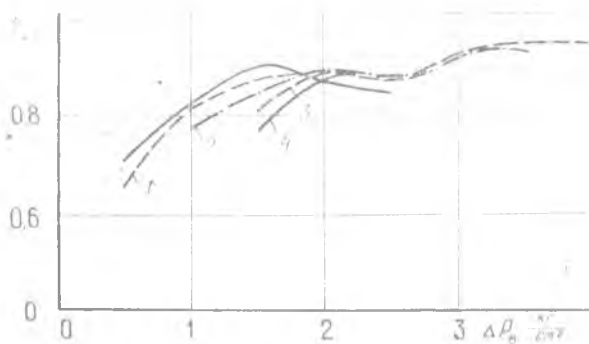


Рис. 36. Влияние перепада воздуха на форсунке на полноту сгорания: 1, 2, 3, 4 — соответственно $\alpha = 3,5; 4; 4,5; 5$

Форкамеры. Фронтные устройства, входящие в эту группу, разработаны с целью получения устойчивого горения в условиях низких температур и давлений воздуха, когда простой V-образный стабилизатор не обеспечивает устойчивого воспламенения ТВС.

Форкамера — это миниатюрная кольцевая камера с задресселированным фронтным устройством (завихрители или V-образный уголок), создающим в ней течение с малыми скоростями (10—15 м/с). Сочетание малой скорости и полной изолированности зоны горения от окружающей среды обеспечивают высокоэффективное ($\eta_z \geq 90\%$) и устойчивое горение в форкамере и, в соответствии с зависимостью (6), стабильное воспламенение ТВС, обтекающей форкамеру. По данным [4], струя при температуре 1600—1700 К стабильно воспламеняет ТВС с температурой 320 К до скоростей, близких к звуковым.

Истечение газа из форкамеры в поток ТВС может осуществляться:

в виде плоской струи;

в виде поперечных струй, протекающих через отверстия в стенках форкамеры (рис. 37);

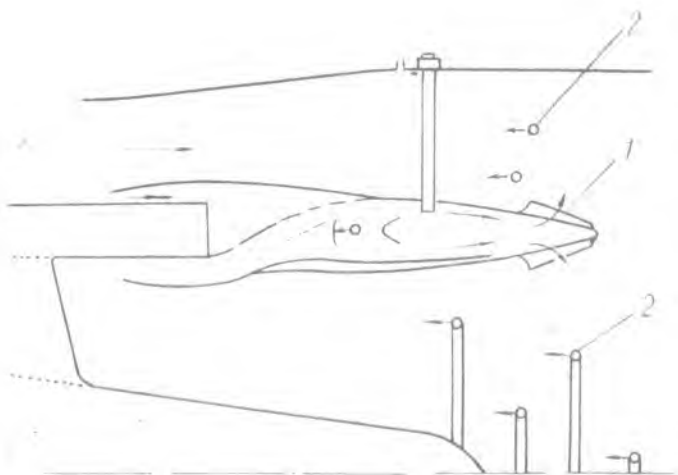


Рис. 37. Форкамера с поперечной подачей струй пламени: 1 — окна для струй пламени; 2 — топливные коллекторы

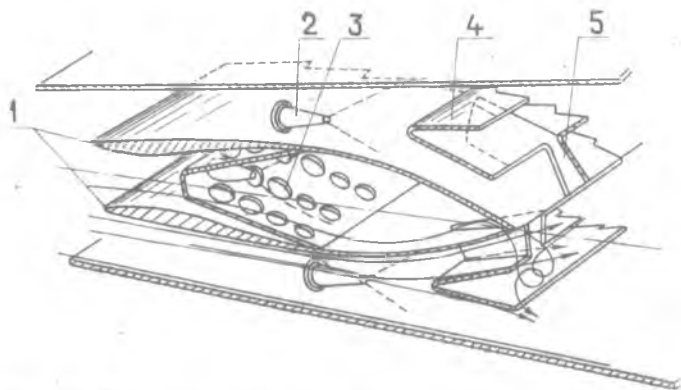


Рис. 38. Форкамера с большим числом плоских струй; 1 — форкамера; 2 — форсунки; 3 — фронтное устройство; 4 — V-образный стабилизатор; 5 — каналы для струй пламени

в виде большого числа плоских струй (рис. 38);
 путем заполнения зоны циркуляции за V-образными радиальными стабилизаторами, соединенными с форкамерой (см. рис. 15); V-образные стабилизаторы (рис. 39) могут иметь кольцевую форму.

Переходной конструкцией от простых стабилизаторов к фор-

камерам является фронтное устройство (рис. 40). Отличие от простых стабилизаторов заключается в большей независимости процесса в зоне циркуляции от окружающих условий. Такие устройства целесообразны в ТРДДФ с малой степенью двухконтурности.

Как следует из уравнения (6), устойчивость стабилизации пламени в форсажной камере определяется температурой газа в зоне циркуляции T_u .

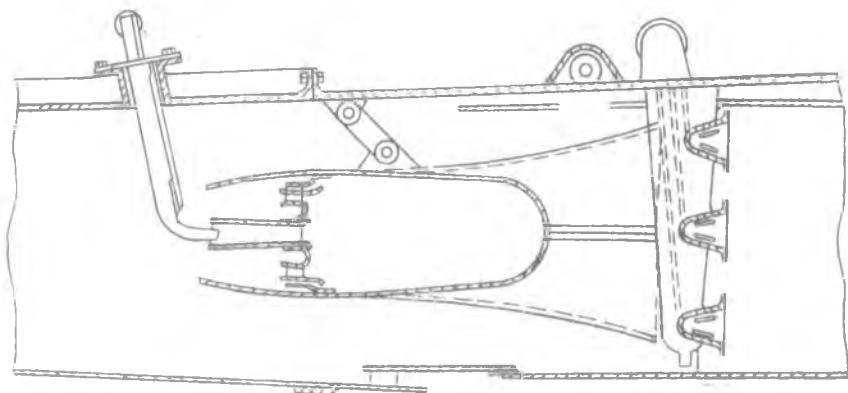


Рис. 39. Форкамера для стабилизации пламени во II контуре ТРДДФ

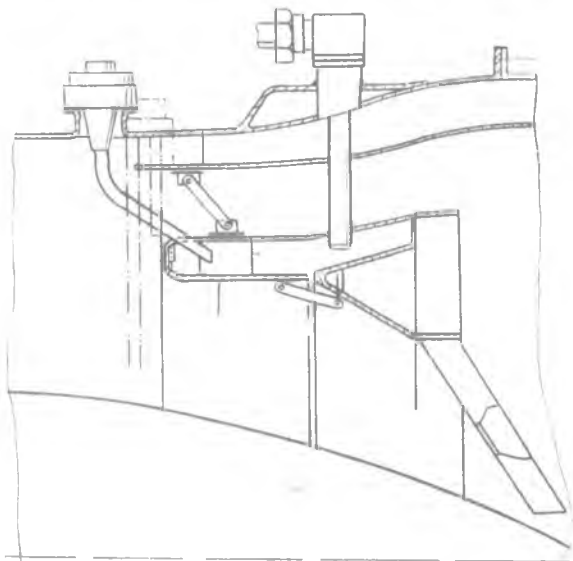


Рис. 40. Фронтное устройство

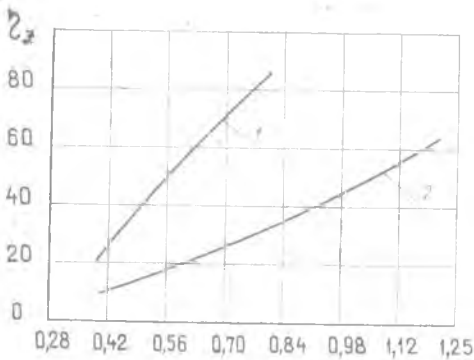


Рис. 41. Влияние скорости и давления потока воздуха в форкамере на полноту сгорания в ней

Температура газа в форкамере зависит от полноты сгорания, на которую влияют параметры (W_0 , P_0 , T_0) воздуха, втекающего в нее. Эти параметры изменяются с изменением высоты и скорости полета. При неблагоприятных сочетаниях они способны оказать значительное отрицательное влияние на полноту сгорания и соответственно на температуру газов (рис. 41). На этом рисунке показано изменение полноты сгорания в форкамере миделем 75 мм при изменении давления от 1 до 0,42 кг/см² и скорости потока в форкамере от 7,5 (кривая 1) до 15 м/с (кривая 2).

Из приведенных на рис. 41 данных следует, что для обеспечения устойчивой стабилизации пламени конструктор должен предусмотреть в форкамере условия (z , W_0), способные при эксплуатационном изменении P_0 и T_0 сохранять полноту сгорания не ниже 80%. Достигается это выбором миделя форкамеры и скорости воздуха в ней в соответствии с рис. 42.

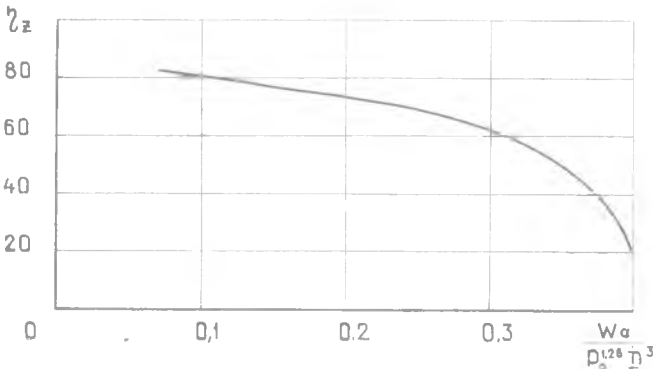


Рис. 42. Критериальное представление влияния параметров потока форкамеры на полноту сгорания в ней

Вторым направлением обеспечения устойчивой стабилизации является размещение форкамеры в зоне высоких температур (> 770 К), к примеру в потоке I контура. По данным [6], в об-

ласти температур > 700 К отрицательное влияние уменьшения давления воздуха и роста скорости значительно ослабевает.

Горение топливо-воздушной смеси

Протяженность зоны горения (длина камеры) связана с параметрами потока: скоростью W_0 , масштабом турбулентности ϵ_0 , пульсационной скоростью W_0' и нормальной скоростью распространения пламени U_n зависимостью

$$L_z = W_0 \frac{l_0}{W_0} \ln \left(1 + \frac{W_0'}{U_n} \right). \quad (13)$$

На изменение длины зоны горения влияют физические параметры потока ТВС и геометрические характеристики камеры [7].

Влияние физических параметров потока рассмотрено в разделе «Химическая характеристика».

К геометрическим характеристикам камеры сгорания относятся: форма и размер стабилизатора; расстояние между стабилизаторами.

Форма стабилизатора. Влияние формы стабилизатора на протяженность зоны горения проявляется через угол раскрытия. С его увеличением возрастает интенсивность турбулентного следа, что приводит к увеличению скорости горения, соответствующему возрастанию угла расширения факела, и к уменьшению длины зоны выгорания.

Размер стабилизатора. При прочих равных условиях длина зоны горения практически не зависит от размера стабилизатора данной геометрической формы.

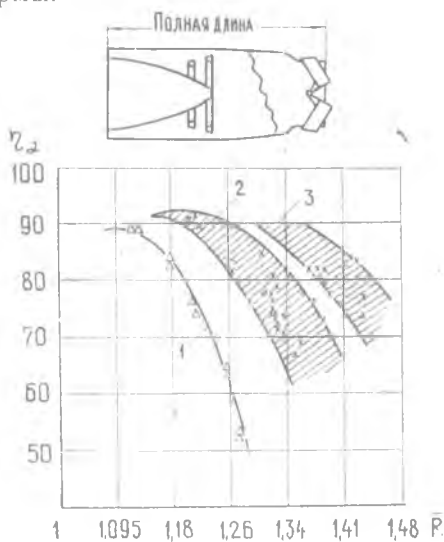


Рис. 43. Влияние площади стабилизаторов и длины форсажной камеры на полноту сгорания: 1 — длина 1,5 м, одиночный стабилизатор; 2 — длина 1,5 м, два стабилизатора; 3 — длина 2 м, два стабилизатора

Влияние расстояния между стабилизаторами (числа стабилизаторов). На рис. 43 видно, что длина зоны горения существенно зависит от расстояния между стабилизаторами, т. е. от их числа: Она сокращается практически линейно с уменьшением расстояния между стабилизаторами. Положительное влияние увеличения числа стабилизаторов на η_z или сокращение длины камеры при заданном η_z является результатом возрастания среднего уровня турбулентности.

Таким образом, влияние геометрических характеристик камеры на η_z или длину зоны горения проявляется через изменение турбулентных характеристик потока и конкретно — величин l_0 и W' , входящих в зависимость (12).

Для повышения η_z в камерах сгорания ПВРД перпендикулярно к потоку устанавливаются реданы (пластины) для его турбулизации.

Тепловые и акустические экраны

Защита корпуса камеры от высокотемпературного ($T_g^* \sim 2000$ К) газа осуществляется установкой вблизи него экрана и подачей в канал между ними холодного газа ($T_g^* < 700$ К) в ТРДФ и воздуха II контура ($T_{II}^* < 500$ К) в ТРДДФ и ПВРД. Внутренняя поверхность экранов, обращенная к зоне горения, защищается пленкой охлаждающего воздуха. Охлаждение экранов — конвективное с внешней стороны и заградительное со стороны зоны горения.

Воздух на создание заградительного охлаждения может подаваться через щели (рис. 44, а) или через отверстия в гофрах экрана (рис. 44, б).

Тепловые экраны в форсажной камере и камере ПВРД выполняют и функцию акустического демпфера, позволяющего уменьшить или полностью устранить колебания давления газа при вибрационном горении. Для этого в экранах выполняются отверстия (рис. 44, в). Диаметр отверстий, расстояния между ними и экраном и корпусом камеры выбираются из условия получения наилучших демпфирующих свойств. Этого можно достигнуть при равенстве частоты колебания давления газа при вибрационном горении собственной частоте резонаторов, образуемых системой экран — корпус камеры. Собственная частота резонаторов связана с перечисленными размерами соотношением

$$f = a \sqrt{\frac{S}{LV}}, \quad (14)$$

где f — частота; a — скорость звука;

S — площадь отверстия;

L — толщина экрана;

V — объем резонатора.

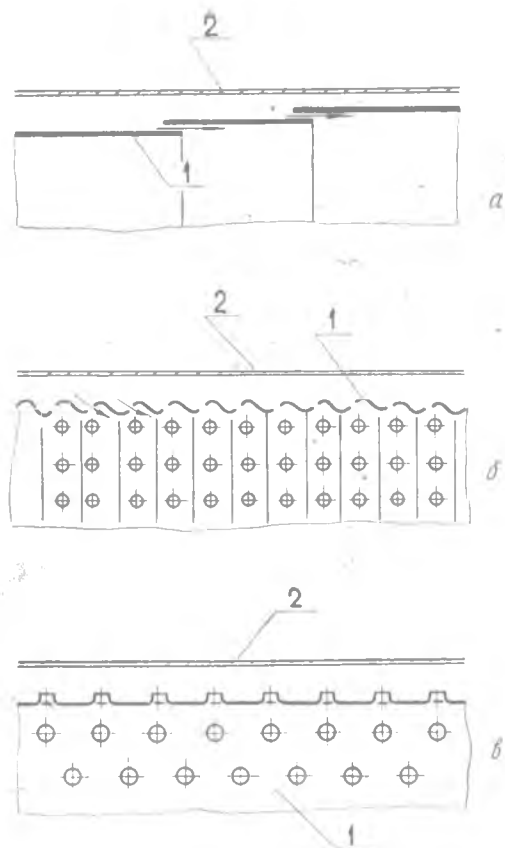


Рис. 44. Тепловые (а, б) и акустические (в) экраны: 1 — экран; 2 — корпус камеры

Хороший эффект достигается с помощью экранов при демпфировании колебаний с частотами более 500 Гц. При меньших частотах, согласно (14), требуются значительные расстояния (> 70 мм) между экраном и корпусом, в 3 раза и более превышающие обычные. Однако это увеличивает вес камеры и гидравлические потери в ней из-за роста скорости. Поэтому для повышения эффективности экрана на низких частотах устанавливают завихрители, создающие вихревое движение газа при прохождении его через отверстие в экране в том и другом направлениях в процессе колебаний.

Этапы проектирования камеры

Количество и содержание этапов проектирования и доводки форсажной камеры определяются соответствующими этапами проектирования двигателя.

Можно выделить четыре характерных этапа: предэскизная завязка основных данных двигателя по тяге, габаритам, весу и высотно-скоростным характеристикам; выполнение эскизного проекта двигателя; выполнение технического проекта; проведение экспериментальной доводки узлов, систем и двигателя в целом для получения проектных данных [1].

На этапе предэскизной завязки основных данных двигателя и самолета характеристики двигателя формируются не в результате просчета всех характеристик входящих в него узлов, а по итоговым статистическим данным о существующих двигателях при некоторой экстраполяции их с учетом возможного технического прогресса.

При использовании методов системы автоматизации проектирования (САПР) с помощью ЭВМ этот этап условно называется САПР нулевого уровня.

На этапе эскизного проектирования двигателя выбор оптимальных параметров термодинамического цикла двигателя (π_k , T_4 и т. д.) по весу, габаритам проводится по характеристикам основных узлов двигателя. В настоящее время этот этап проектирования выполняется методами САПР и получил условное название САПР 1-го уровня. Для составления соответствующих алгоритмов и программ расчетов характеристики всех основных узлов и систем двигателя должны быть представлены в САПР в виде автономных блоков подпрограмм расчетов.

Характеристики форсажной камеры на этом этапе проектирования представляются в виде зависимостей:

$$\sigma, D \text{ и } M, \bar{p} = f(W_0, T_0, P_0, \alpha_\Sigma, m),$$

которые базируются на известных данных по камерам-прототипам, на литературных данных и учитывают в той или иной мере возможность технического прогресса.

После утверждения эскизного проекта двигателя составляется техническое задание (ТЗ) на выполнение технического проекта двигателя и его основных узлов и систем.

При составлении ТЗ на технический проект форсажной камеры сгорания должны быть учтены те требования к ней, которые вытекают:

1 — из эскизного проекта — по D габ, длине L , массе M ;

2 — из термодинамических расчетов высотно-скоростных характеристик двигателя по основным «выходным» параметрам камеры;

$$\sigma, \eta_z, \alpha_{\max}, \alpha_{\min};$$

3 — из тактико-технических требований (ТТТ) на самолет по диапазону бесрывной работы и области надежного розжига, по темпу «дачи» и «сброса» форсажа и т. п.;

4 — из требований смежных узлов и систем двигателя.

На этапе выполнения технического проекта в результате термодинамических расчетов и необходимости выполнения требований ТЗ оказываются однозначно заданными и «входные» параметры форсажной камеры (W_0, P_0, T_0, α), и ее «выходные» параметры ($\eta_z, \sigma, \alpha_{cp}$). Но для той или иной предварительно выбранной, например по прототипу, геометрии камеры значения «выходных» параметров являются следствием значений «входных» параметров:

$$\sigma, \eta_z, \alpha_{cp} = f(W_0, T_0, P_0, \alpha).$$

Эта функциональная связь для камер-прототипов обычно бывает известна или может быть рассчитана для традиционных форм и обычных значений входных параметров по литературным данным. Как правило, результаты таких оценочных расчетов показывают, что не удается достичь требуемых в ТЗ величин выходных параметров. В этом и кроется причина возникновения проблем проектирования камер. И это естественно: известная функциональная связь (V) является отражением прошлого опыта, а уровень требований и в ТТТ на самолет, и в ТЗ на двигатель и его узлы непрерывно повышается в расчете на прогресс авиационной техники.

Разрешение возникающих проблем затруднено также тем, что требования ТЗ на форсажную камеру оказываются противоречивыми: мероприятия, полезные для выполнения одного из требований, противоречат мероприятиям, обеспечивающим выполнение других требований. Так, для достижения высоких значений η_z и большой высотности бесрывной работы полезно увеличить гидравлическое сопротивление камеры, ее поперечные и долевые размеры сверх значений, указанных в ТЗ. Поэтому ка-

меры сгорания каждого двигателя представляют собой более или менее удачный компромисс между различными противоречивыми требованиями. А это означает, что приходится корректировать данные эскизного проекта и ТЗ на камеру и выдвигать встречные требования к другим узлам и системам двигателя. Из этого понятно и то, что чем больше оригинальных конструктивных решений и мероприятий будет найдено для удовлетворения тех или иных требований не в ущерб другим, тем меньше придется искать компромиссов. А каждый компромисс всегда означает нанесение определенного ущерба каждому противоречащему требованию, т. е. общему техническому уровню проектируемого двигателя.

Приведенные в главе III конкретные примеры организации процесса горения в форсажных камерах и служат как раз главной цели проектирования: в зависимости от уровня новых требований в ТЗ на камеру нужно найти такой вариант конструкции, который в наибольшей степени удовлетворит противоречивым требованиям ТЗ.

По изложенным причинам использование САПР на этапе технического проектирования ограничено. На ЭВМ рассчитываются лишь отдельные известные процессы и соответствующие им «выходные» характеристики:

$$\sigma = f(W_0), t_{ст} = f(\alpha_{лрист}); t_T = f(M).$$

Этап экспериментальной доводки (отработки) необходим потому, что любое введение в конструкцию новых (по сравнению с прототипом) элементов, а тем более применение новой схемы организации рабочих процессов при необычном сочетании «входных» параметров (W_0, T_0, P_0), не позволяет при современном уровне развития теоретических и инженерных методов расчета определить выходные характеристики (σ, η_z) расчетным путем. Экспериментальную отработку обычно проводят на отсеках камеры в модельных и натуральных условиях, а также на полноразмерной камере сгорания в условиях ее автономных испытаний в ТБК и установки на двигатель. Двигатель при этом устанавливают в термобарокамере, затем — на летающей лаборатории и в конце концов проводят экспериментальные исследования в натуральных эксплуатационных условиях на самолете.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория воздушно-реактивных двигателей/Под ред. С. Н. Шляхтенко. М.: Машиностроение, 1975.
2. Зуев В. С., Скубачевский Л. С. Камеры сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Оборонгиз, 1958.

- 3 Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей/Под ред. У. Р. Хауторна и У. Г. Олсона. М.: Машиностроение, 1964.
- 4 Щетинков Е. С. Физика горения газов. М.: Машиностроение, 1964.
- 5 Горбунов Г. М. Выбор параметров и расчет основных камер сгорания ГТД. М.: МАИ, 1972.
- 6 Талантов А. В. Горение в потоке. М.: Машиностроение, 1978.
- 7 Раушенбах Б. В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964.
- 8 Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1974.
- 9 Пономарев Б. А. Двухконтурные турбореактивные двигатели. М.: М. О., 1973.
- 10 Стенькин Е. Д., Фишбейн Б. Д. Тепловые потери полного давления в газовом потоке. — В сб.: Некоторые вопросы проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуАИ, 1970, вып. 45.
- 11 Кузнецов Н. Д. Надежность газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1978, № 2.

Оглавление

Введение	3
Основные условные обозначения	5
Глава I. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС В ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЕ	6
§ 1. Принципиальные схемы форсажной камеры и камеры ПВРД	6
§ 2. Основные характеристики камер	8
Аэродинамическая характеристика	10
Химическая характеристика	13
Срывная характеристика	15
Степень форсирования тяги	15
Глава II. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ	16
§ 1. Организация горения в форсажной камере ТРДД	16
§ 2. Стабилизация пламени	17
§ 3. Пути предотвращения вибрационного горения	19
§ 4. Получение высокой подлоты сгорания	20
§ 5. Достижение газодинамической устойчивости системы форсажная камера — двигатель на нестационарных режимах	20
§ 6. Тепловое состояние деталей камеры	21
Глава III. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ФОРСАЖНЫХ КАМЕР	22
§ 1. Общие сведения	22
§ 2. Форсажные камеры ТРДФ	22
§ 3. Форсажные камеры ТРДДФ	25
§ 4. Вихревые камеры сгорания	29
§ 5. Форсажные камеры для II контура ТРДДФ	35
§ 6. Форсажная камера для СВВП	37
§ 7. Камера сгорания ПВРД	38
§ 8. Устройство и принцип работы основных узлов форсажной камеры	40
Глава IV. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАМЕРЫ	58
Литература	60

Темплан 1982, поз. 2106

*Виктор Павлович Лукачев,
Владимир Васильевич Токарев,
Александр Семенович Фрейдин*

ВЫБОР СХЕМЫ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ ВРД

Редактор Э. Грязнова
Техн. редактор Н. Каленюк
Корректор Н. Куприянова

Сдано в набор 30.10.82 г. Подписано в печать 13.12.82 г.
ЕО00113. Высокая печать. Литературная гарнитура.
Усл. п. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,8. Заказ 962.
Т. 400 экз. Цена 15 к.

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

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