



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Факультет «А» РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
Кафедра ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Отчет по производственной практике

Студент группы А9М31

подпись, дата А.С. Акилов

Проверил

подпись, дата И.В. Тетерина

Санкт-Петербург, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Руководство по эксплуатации газотурбинного двигателя	3
1.1 Оформление страниц руководства	3
1.2 Лист регистрации изменений	3
1.3 Перечень действующих страниц	4
1.4 Технологические карты	6
2 Турбовальный двигатель ТВЗ-117	7
2.1 Компрессор	7
2.2 Камера сгорания	8
2.3 Узел турбин	9
3 Проектирование КС	12
3.1 Исходные данные для проектирования КС	12
3.2 Определение основных размеров КС	12
3.2.1 Объем жаровой трубы	13
3.2.2 Распределение воздуха в жаровой трубе	13
3.3 Расчет температур элементов КС	16
3.4 Проектирование на заданную эмиссию	18
3.4.1 Двухзонная КС	21
3.4.2 Многофорсуночная КС	21
3.4.3 КС с гомогенизацией рабочей смеси	21
3.4.4 Каталитические КС	22

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных документов сопровождающих выпуск любого авиационного двигателя является руководство по его эксплуатации. В данных документах приведены основные сведения о конструкции и работе двигателя, его узлов, систем и агрегатов, описаны методы отыскания и устранения неисправностей, а также технология демонтажа и монтажа деталей, узлов и агрегатов, заменяемых в эксплуатации, методика осмотров, проверок, регулировок и других видов обслуживания двигателя и его систем.

Цели задачи производственной практики: ознакомиться со структурой руководств по эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей на примере двигателя ТВЗ-117;

1 Руководство по эксплуатации газотурбинного двигателя

Руководства по эксплуатации газотурбинных двигателя состоят из трех книг. Первые две книги являются общими для всех модификаций двигателя.

В первой книге помещен раздел:

- Двигатель.

Во второй книге помещены разделы:

- Топливная система двигателя;
- Система отбора воздуха;
- Приборы контроля двигателя;
- Система запуска двигателя.

В третьей книге приведены отличия конструкции, особенности эксплуатации и технического обслуживания конкретной модификации двигателя.

Для отыскания требуемого материала в начале каждого раздела руководства приведено его содержание. В каждом разделе (подразделе, пункте) материал разделяется на темы с нумерацией страниц по следующему единому принципу: описание и работа с 1 по 100 страницу, отыскание и устранение неисправностей с 101 по 200 страницу, технология обслуживания с 201 по 300 страницу. Технология обслуживания в отдельных случаях детально разделяется на другие подразделы.

В начале каждой книги руководства приводится перечень основных сокращения и условных обозначений, используемых в тексте руководства.

1.1 Оформление страниц руководства

Вверху каждой страницы указывается название руководства по эксплуатации. Внизу страницы указывается номер текущего раздела, подраздела, пункта, номер страницы и дата последнего изменения этой страницы.

1.2 Лист регистрации изменений

В начале каждой книги руководства присутствует лист регистрации изменений, в котором указываются номер раздела, подраздела, пункта и номер страницы, информация на котором подвергается какому-либо изменению. Также здесь отмечают название документа, сопровождающего это изменение (бюллетень), и дату его проведения.

ТВЗ-117
РУКОВОДСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА ДВИГАТЕЛЯ — ОПИСАНИЕ И РАБОТА

1. Общая часть

1.1. Топливная система двигателя предназначена для очистки, подачи и регулирования расхода топлива (G_f) в камеру сгорания (КС) двигателя, управления механизацией компрессора двигателя и отключения воздушного стартера (СВ).

1.2. Топливная система включает в себя:

систему низкого давления;
систему основного контура;
систему ограничения температуры газов (t_g) перед турбиной компрессора;
систему защиты свободной турбины (СТ);
дренажную систему;
трубопроводы.

На некоторых модификациях в топливную систему входит система ограничения режимов работы двигателя (см. кн. 3, 073.15.00).

1.3. Взаимодействие элементов топливной системы, а также ее управление показано в кн. 3 (см. 073.00.00, рис. 1).

2. Описание

2.1. Система низкого давления.

Система низкого давления предназначена для повышения давления топлива, его очистки и подачи в систему основного контура.

Описание и работа системы приведены в 073.11.00.

2.2. Система основного контура.

Система основного контура предназначена для подачи топлива в камеру сгорания, регулирования его расхода, управления механизацией компрессора и отключения воздушного стартера.

Описание и работа системы приведены в 073.12.00.

2.3. Система ограничения температуры газов перед турбиной.

Система ограничения t_g перед турбиной предназначена для автоматического ограничения до заданного предела t_g перед турбиной компрессора уменьшением подачи топлива в камеру сгорания.

Описание и работа системы приведены в 073.17.00.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО: ВСЕ

073.00.00

Стр. 1
Янв 15/86

Рисунок 1.1 – Пример оформления листов руководства по эксплуатации

1.3 Перечень действующих страниц

Далее по документу приводится перечень действующих страниц. Здесь указываются все разделы руководства, соответствующие им номера страниц и даты их последнего изменения.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

Изм.	Номер раздела, подраздела, пункта	Номер страницы			Номер доку- мента	Входящий № сопро- водитель- ного до- кумента и дата	Под- пись	Дата
		изме- ненной	новой	анну- лиро- ванной				

Рисунок 1.2 – Лист регистрации изменений

ПЕРЕЧЕНЬ ДЕЙСТВУЮЩИХ СТРАНИЦ

Раздел, подраздел, пункт	Стр.	Дата	Раздел, подраздел, пункт	Стр.	Дата
Введение	1	Янв 15/86	073.01.00	5	Нояб 17/93
	2	Янв 15/86		6	Нояб 04/03
	3	Янв 15/86			
	4	Янв 15/86			
Шмунгитул	—	—	073.02.00	1	Нояб 04/03
				2	Нояб 04/03
				3	Нояб 04/03
				4	Нояб 04/03
Лист регистрации изменений	1	Нояб 04/03		201	Нояб 04/03
	2	Янв 15/86		202	Нояб 04/03
				203/204	Нояб 04/03
				205/206	Янв 15/86
Перечень действующих страниц	1	Нояб 04/03		207	Нояб 04/03
	2	Нояб 04/03		208	Нояб 04/03
	3	Нояб 04/03		209/210	Нояб 04/03
	4	Нояб 04/03			
Содержание	1	Нояб 04/03	073.11.00	1/2	Янв 15/86
	2	Нояб 04/03	073.11.01	1	Янв 15/86
	3	Нояб 04/03		2	Янв 15/86
	4	Нояб 04/03		3/4	Нояб 04/03
073.00.00	1	Янв 15/86		5	Янв 15/86
	2	Нояб 04/03		6	Нояб 04/03
	3/4	Нояб 04/03		7/8	Янв 15/86
	101	Нояб 04/03		101	Янв 15/86
	102	Янв 15/86		102	Янв 15/86
	103	Нояб 04/03		201/202	Нояб 04/03
	104	Нояб 04/03	073.11.04	1	Нояб 04/03
	201	Янв 15/86		2	Нояб 04/03
	202	Янв 15/86		3/4	Нояб 04/03
	203	Янв 15/86		201/202	Янв 15/86
	204	Янв 15/86		203/204	Янв 15/86
	205/206	Янв 15/86		205/206	Нояб 04/03
	207/208	Янв 15/86		207	Нояб 04/03
				208	Нояб 04/03
				209/210	Янв 15/86
				211	Янв 15/86
073.01.00	1	Янв 15/86		212	Янв 15/86
	2	Янв 15/86		213/214	Янв 15/86
	3	Нояб 04/03		215	Нояб 04/03
	4	Нояб 17/93			

Рисунок 1.3 – Перечень действующих страниц

1.4 Технологические карты

Неотъемлемой частью руководства по эксплуатации являются технологические карты. В них содержатся необходимые сведения, инструкции для персонала, выполняющего какой либо технологический процесс или техническое обслуживание двигателя.

К РО №	ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА №202	На страницах 207...208
Пункт РО	Наименование работы: Замена штуцера-эжектора, прочистка жиклерного отверстия эжектора и продувка воздушного трубопровода	
Содержание операции и технические требования (ТТ)		Работы, выполняемые при отклонениях от ТТ
<p>1. Демонтаж</p> <p>1.1. Расстопорите и отверните накидные гайки трубопровода подвода воздуха к штуцеру (1) эжектора (см. рис. 4), трубопровода подвода дренажного топлива, расстопорите штуцер-эжектор.</p> <p>1.2. Отведите на себя трубопровод подвода воздуха и, отворачивая штуцер-эжектор, выведите поворотный штуцер (2) из соединения с ниппелем трубопровода подвода дренажного топлива, выверните полностью штуцер-эжектор из Корпуса (3) патрубка вместе с поворотным штуцером (2) и уплотнительными кольцами на нем.</p> <p>2. Монтаж</p> <p>2.1. Переставьте поворотный штуцер (2) и уплотнительные кольца на устанавливаемый штуцер-эжектор, отведите на себя трубопроводы, заверните штуцер-эжектор в корпус (3), предварительно подсоединив к поворотному штуцеру (2) трубопровод подвода дренажного топлива.</p> <p>2.2. Заверните, затяните и застопорите все детали узла. ВНИМАНИЕ. ВО ИЗБЕЖАНИЕ ПОЛОМКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОТВОРАЧИВАНИИ И ЗАВОРАЧИВАНИИ НАКИДНЫХ ГАЕК ТРУБОПРОВОДОВ И ШТУЦЕРА-ЭЖЕКТОРА ПРИДЕРЖИВАЙТЕ СОЕДИНЯЕМУЮ ДЕТАЛЬ ВТОРЫМ КЛЮЧОМ.</p> <p>3. Прочистка жиклерного отверстия эжектора и продувка воздушного трубопровода</p> <p>3.1. Расстопорите и отверните гайки трубопроводов подвода воздуха и топлива к штуцеру (1) эжектора.</p>		Контроль

Рисунок 1.4 – Пример технологической карты

2 Турбовальный двигатель ТВЗ-117

Турбовальный двигатель ТВЗ-117 предназначен для установки на вертолет. По своим техническим данным и эксплуатационным качествам двигатель соответствует современным техническим требованиям, предъявляемым к двигателям данного класса.

Двигатель эксплуатируется в составе силовой установки вертолета, куда входят два двигателя. Правый и левый двигатели силовой установки взаимозаменяемы при условии разворота выхлопного патрубка.

Особенностью конструкции турбовального двигателя является наличие свободной турбины (СТ), кинематически не связанной с ротором турбокомпрессора (ТК). Мощность, развиваемая свободной турбиной, передается редуктору и составляет эффективную мощность двигателя. Эта особенность имеет ряд конструктивных и эксплуатационных преимуществ: позволяет получить желаемую частоту вращения ротора свободной турбины независимо от частоты вращения ротора турбокомпрессора двигателя; облегчает раскрутку ротора ТК при запуске двигателя; позволяет получить оптимальные расходы топлива при различных условиях эксплуатации двигателя; исключает необходимость фрикционной муфты в силовой установке вертолета. Двигатель может эксплуатироваться на вертолете как с установленным на входе пылезащитным устройством, так и без него. На отдельных модификациях может быть установлено экрано-выхлопное устройство.

Двигатель состоит из следующих основных узлов и систем:

- осевого компрессора;
- камеры сгорания;
- узла турбин;
- выхлопного устройства;
- приводов вспомогательных устройств;
- системы смазки и суфлирования;
- топливной системы;
- системы отбора воздуха;
- приборов контроля работы двигателя;
- системы запуска.

2.1 Компрессор

Компрессор двигателя - осевой, двенадцатиступенчатый, с поворотными лопатками входного направляющего аппарата и направляющих аппаратов первых четырех ступеней, с двумя клапанами перепуска воздуха из-за седьмой ступени компрессора.

Корпус компрессора состоит из четырех кольцевых корпусов, в кото-

рые монтируются лопатки поворотных направляющих аппаратов первых четырех ступеней, направляющих аппаратов 5-II ступеней (состоящих из двух половин) колец рабочих колес и спрямляющего аппарата. Передним фланцем корпус компрессора крепится к корпусу первой опоры двигателя, задним фланцем - к фланцу наружного корпуса диффузора камеры сгорания.

Ротор компрессора - дискобарабанной конструкции. Все диски, кроме диска первой ступени, сварены между собой. Диск первой ступени крепится к барабану. Крепление лопаток осуществляется замком типа "ласточкин хвост". Передний роликовый подшипник ротора установлен в корпусе первой опоры, задний шариковый подшипник ротора установлен в корпусе второй опоры, который крепится к спрямляющему аппарату.

Для управления лопатками на их верхних цапфах установлены рычаги, которые через сферические подшипники входят в зацепление с осями поворотных колец.

Входной направляющий аппарат состоит из отдельных поворотных лопаток, установленных верхними и нижними цапфами в соответствующие гнезда корпуса первой опоры. В нижних цапфах лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) имеются отверстия, через которые горячий воздух из кольцевой полости первой опоры поступает на обогрев передних кромок лопаток ВНА.

2.2 Камера сгорания

Камера сгорания служит для преобразования химической энергии топлива в тепловую путем организации эффективного сгорания топлива в потоке воздуха, поступающего из компрессора.

Камера сгорания двигателя - кольцевая, прямоточная, состоит из следующих основных узлов: корпуса камеры сгорания, являющегося наружным корпусом диффузора, внутреннего корпуса диффузора, жаровой трубы и топливного коллектора с двенадцатью форсунками.

Передним фланцем корпус камеры сгорания крепится к корпусу спрямляющего аппарата компрессора, а задним - к корпусу сопловых аппаратов турбины компрессора.

В переднем поясе корпуса камеры сгорания расположены: фланец, дренажный штуцер, фланец подвода масла, два фланца для крепления трубок суфлирования, два фланца для установки свечей зажигания, три фланца для крепления подвесок, при помощи которых устанавливается коллектор. В задней части корпуса камеры сгорания расположен фланец, к которому крепится трубка отбора воздуха на противообледенительную систему.

Жаровая труба кольцевого типа состоит из наружного и внутреннего обтекателей с вваренными во внутренний обтекатель двенадцатью завих-

рителями, двух секций смесителя и двух опорных секций.

Наружный обтекатель, внутренний, опорные секции соединяются между собой гофрированными кольцами, к опорным секциям приварены опорные кольца. Хвостовая часть жаровой трубы опирается на внутреннюю и наружную обоймы соплового аппарата турбины компрессора опорными кольцами. На наружном обтекателе жаровой трубы имеются девять втулок для установки подвесок жаровой трубы, которыми она крепится к корпусу камеры сгорания. На четырех подвесках установлены штуцера, через которые производится отбор воздуха.

В зону горения жаровой трубы воздух поступает через отверстия в наружном обтекателе, а также через двенадцать завихрителей. В завихрителях установлены плавающие кольца, служащие для компенсации термических расширений жаровой трубы.

Работает камера следующим образом: сжатый воздух поступает из компрессора в переднюю полость кольцевого диффузора, в которой разделяется на два потока: первичный, попадающий в зону горения жаровой трубы, и вторичный, идущий на охлаждение жаровой трубы и турбины. Вторичный воздух, поступивший в кольцевые каналы, образованные наружным и внутренним обтекателями жаровой трубы и наружным и внутренним корпусами диффузора, омывает стенки жаровой трубы, а также через щели и отверстия в секциях входит в жаровую трубу. В передней части жаровой трубы происходит интенсивное сгорание топлива в завихренном потоке воздуха. В задней части жаровой трубы происходит перемешивание горячих газов с поступающим вторичным воздухом и соответствующее снижение температуры газов. Распыленное форсунками топливо сгорает в завихренном потоке воздуха, и горячие газы попадают в зону смешения. В зоне смешения к горячим газам добавляется вторичный воздух, поступающий через отверстия, имеющиеся в наружной и внутренней секциях. Эффективное охлаждение стенок жаровой трубы осуществляется вторичным воздухом, входящим внутрь жаровой трубы через наружные и внутренние щели, образованные гофрированными кольцами. Количество и размер отверстий и щелей жаровой трубы подобраны таким образом, что они обеспечивают хорошее перемешивание газов, высокий коэффициент полноты сгорания и равномерное температурное поле горячих газов перед сопловым аппаратом турбины компрессора.

2.3 Узел турбин

Двигатель имеет две кинематически не связанные между собой турбины: турбину компрессора, которая предназначена для привода компрессора и агрегатов двигателя, и свободную турбину, обеспечивающую привод винтов вертолета через трансмиссию и редуктор, а также привод агрегатов

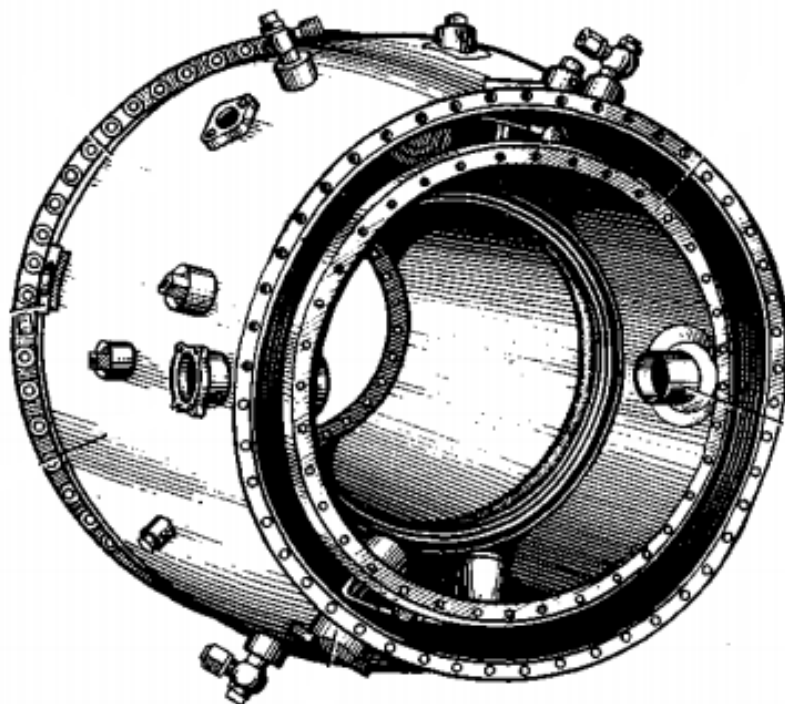


Рисунок 2.1 – КС ТВЗ-117

редуктора.

Турбина компрессора - двухступенчатая осевая, служит для привода компрессора и агрегатов двигателя.

Корпус сопловых аппаратов турбины компрессора сварной и крепится своим передним фланцем к фланцу корпуса камеры сгорания, а задним фланцем - к корпусу соплового аппарата свободной турбины. На наружной поверхности корпуса имеются четырнадцать опорных фланцев для крепления термопар. В корпус вставлена обойма с уплотнением, расположенным над гребешками лабиринта рабочего колеса первой ступени турбины компрессора.

Сопловой аппарат первой ступени состоит из наружной обоймы, набора сопловых лопаток, внутренней обоймы и фланца. Наружная обойма спереди крепится к внутреннему фланцу корпуса болтами с применением сухарей, которые обеспечивают радиальное смещение наружной обоймы относительно корпуса без нарушения центрирования, а сзади устанавливается и центрируется на кольце, которое фиксируется в осевом направлении обоймой. В наружной обойме имеются прорези для установки сопловых лопаток и четырнадцать отверстий под термопары. Внутренняя обойма соединена болтами с фланцем, которым она крепится к внутреннему корпусу диффузора камеры сгорания. К конусной части фланца приклепан корпус

лабиринта и приварен корпус лабиринта с уплотнениями. На внутренней обойме имеются профильные прорезы для установки сопловых лопаток. Сопловые лопатки - литые, полые. Для охлаждения сопловых лопаток вторичный воздух камеры сгорания поступает через втулки в полость лопаток и через отверстия на выходных кромках поступает в проточную часть.

Ротор турбины компрессора состоит из вала, двух дисков - первой ступени и второй ступени, с рабочими лопатками, а также четырех покрывающих дисков. Вал и диски первой и второй ступеней сцентрированы и сцеплены друг с другом торцевыми шлицами и стянуты стяжными болтами. Покрывающие диски центрируются, опираясь на соответствующие буртики в дисках первой и второй ступеней. От проворачивания относительно ротора первый покрывающий диск фиксируется штифтами, второй и третий покрывающий диски - стопорами, четвертый покрывающий диск - стяжными болтами. На валу, а также на первом, втором, третьем и четвертом покрывающих дисках имеются гребешковые пояса (4 пояса), которые совместно с прилегающими деталями статора образуют воздушные лабиринтные уплотнения. Крепление лопаток в дисках осуществляется с помощью замка "елочного" типа. На концах рабочих лопаток имеются полки, которые образуют кольцевой бандаж на периферии рабочего колеса. На наружной поверхности полок выполнены гребешки, которые на периферии рабочего колеса образуют кольцевой газовый лабиринт. Крутящий момент от турбины к компрессору передается через эвольвентные шлицы, имеющиеся на конце вала турбины. Роторы турбины и компрессора соединяются стяжной втулкой, которая стопорится фиксатором. Гайка затягивает внутреннюю обойму подшипника третьей опоры и стопорится стопорным кольцом, входящим торцевыми выступами в пазы на торце цапфы диска второй ступени. Ротор турбины компрессора опирается на две опоры. Передней опорой служит задняя цапфа компрессора с шарикоподшипником второй опоры. Задней опорой служит роликовый подшипник третьей опоры двигателя, на который ротор опирается цапфой диска второй ступени.

Свободная турбина - двухступенчатая, осевая, служит для создания мощности, передаваемой через трансмиссию и редуктор на вращение винтов вертолета, а также агрегатов редуктора.

3 Проектирование КС

Облик КС выбирается, как правило, на базе имеющегося прототипа с учетом традиций и накопленного опыта предприятия, его технологической и производственной базы, сроков создания. За прототип может быть выбрана ранее спроектированная КС с известными характеристиками, наиболее близко отвечающая предъявляемым требованиям. Следует отметить, что создание КС с нужными характеристиками, надежно работающей в течение заданного ресурса, требует проведения значительного объема экспериментально-доводочных работ, как на установках, так и в системе двигателя. Это также заставляет при проектировании новых КС стремиться в максимальной степени использовать опыт создания и доводки предшествующих образцов.

3.1 Исходные данные для проектирования КС

В перечень исходных данных для выполнения проекта входят:

- общие требования к двигателю и его узлам ;
- специальные требования к КС;
- результаты термодинамического расчета двигателя на режимах условного цикла взлетно-посадочных операций;
- характеристики воздушного потока на входе в КС (интенсивность и масштаб турбулентности, распределение давления, температуры и вектора скорости в окружном и радиальном направлениях);
- максимальное располагаемое давление и температура топлива на входе в КС;
- экстремальные соотношения топливо-воздух на режимах приемистости и сброса газа;
- требования к величине отборов воздуха из КС: на охлаждение турбины, противообледенительную систему, систему кондиционирования воздуха и перепусков на запуске;
- требования к количеству, расположению и проходным сечениям воздушных, масляных и суфлирующих магистралей, если они проходят через КС.

3.2 Определение основных размеров КС

Для определения основных размеров КС выполняется проектировочный расчет, который базируется на основных положениях теории рабочего процесса и практическом опыте, накопленном при создании КС авиационных ГТД.

3.2.1 Объем жаровой трубы

Объем жаровой трубы рассчитывается из условия обеспечения заданной полноты сгорания с помощью обобщенной зависимости полноты сгорания топлива от критерия форсирования. Расчет обычно выполняется для максимального режима работы ГТД.

Параметр форсирования по своему физическому смыслу характеризует отношение времени химической реакции ко времени пребывания топлива в КС.

При выборе объема жаровой трубы необходимо учесть следующее.

Во-первых - объем жаровой трубы определяет время пребывания продуктов сгорания при высоких температурах в КС, что в свою очередь влияет на выбросы вредных веществ. С целью уменьшения выбросов NOx необходимо уменьшать время пребывания продуктов сгорания при высоких температурах на взлетном режиме, т.е. уменьшать объем жаровой трубы.

Во-вторых - для обеспечения работы КС на режиме малого газа, низких выбросов СО и НС и обеспечения высотного розжига требуется увеличение объема жаровой трубы, т.к. на этих режимах резко снижается полнота сгорания и увеличивается критерий форсирования.

Окончательный объем жаровой трубы определяется путем нескольких последовательных расчетов, конструкторских проработок и проведения экспериментов на модельных установках, включающих имитацию высотных режимов.

3.2.2 Распределение воздуха в жаровой трубе

После определения объема жаровой трубы выполняется аэродинамическое проектирование, цель которого - обеспечить:

- безотрывность течения воздуха в преддиффузоре;
- оптимальное распределение воздуха в межтрубном пространстве или кольцевых каналах;
- заданные потери давления;
- оптимальное распределение подвода воздуха в жаровую трубу по ее

длине с точки зрения организации процесса горения для обеспечения высокой полноты сгорания топлива, норм на выбросы вредных веществ и формирования требуемой радиальной эпюры температур газа на выходе.

Весь воздух, поступающий в жаровую трубу, можно условно разделить на отдельные характерные составляющие: на систему охлаждения, в ФУ, в зону горения и в зону смешения.

Для распределения расхода воздуха между зонами жаровой трубы часто поступают следующим образом. Вначале выбирается режим сжигания топлива в расчетных условиях и определяется количество воздуха, поступающего в зону горения. Например, при общем коэффициенте избытка

воздуха на выходе из КС $\alpha_{kc} = 3$ при сжигании обедненной ТВС в зоне горения с $\alpha_{гор} = 1,5$ в неё необходимо подать 50% от общего количества воздуха, поступившего в КС. Если выбрана концепция низкотемпературного сжигания обогащенной ТВС с $\alpha_{гор} = 1,5$ в неё необходимо подать 50% от общего количества воздуха, поступившего в КС. Если выбрана концепция низкотемпературного сжигания обогащенной ТВС с $\alpha_{гор} = 0,6$, то в зону горения необходимо подать 20% воздуха.

Для используемых видов керосина (РТ, Т-6, ТС-1, Т-1) стехиометрический коэффициент для воздуха находится в диапазоне от 14,70 до 14,94. Решение задачи по распределению воздуха между ФУ и основными отверстиями зоны горения сводится к отысканию компромиссного варианта, при котором обеспечивается максимальная однородность ТВС, надежность запуска и устойчивость горения во всем диапазоне работы двигателя. Противоречие между этими требованиями заключается в том, что с одной стороны увеличение расхода воздуха через ФУ способствует образованию более однородной ТВС, с другой стороны - это приводит к росту скорости потока в головной части жаровой трубы, что ухудшает условия розжига и сужает область устойчивого горения. В каждом конкретном случае распределение воздуха между ФУ и основными отверстиями выбирается либо по аналогии с ближайшим прототипом, либо на основании имеющихся литературных данных или собственного опыта предприятия и окончательно подтверждается экспериментом.

Оставшийся воздух делится между системой охлаждения и зоной смешения. В связи с тем, что воздух системы охлаждения практически не вовлекается в организацию рабочего процесса в жаровой трубе, его количество стараются ограничить. Особенно это актуально для современных ГТД с высокими термодинамическими параметрами цикла и низкими значениями коэффициента избытка воздуха за КС ($\alpha_{kc} \approx 2,2$). Так, в КС с $\alpha_{kc} = 2,2$, при организации процесса сжигания обедненной ТВС с $\alpha = 1,8$ в зоне горения объем воздуха, оставшегося на зону смешения и охлаждение стенок, будет составлять всего около 18%.

В условиях дефицита воздуха для охлаждения стенок жаровых труб требуется применять высокоэффективные системы охлаждения и теплозащитные покрытия. В каждом конкретном случае величину потребного расхода охлаждающего воздуха предварительно находят из теплового расчета стенки жаровой трубы и затем уточняют по результатам термометрирования на двигателе.

На начальном этапе проектирования геометрические размеры отверстий в стенке жаровой трубы и ФУ можно определить по следующей схеме:

- определяется суммарная эффективная площадь отверстий в стенке жаровой трубы;
- распределяется суммарная эффективная площадь по зонам жаровой

трубы в соответствии с выбранным распределением расхода воздуха;

- определяется геометрическая площадь и фактические размеры отверстий.

Суммарная эффективная площадь отверстий (m^2) в стенке жаровой трубы находим по формуле:

$$F_{ef} \sum = \frac{G_v}{(2\rho\Delta P)^{0,5}},$$

где G_v - расход воздуха через жаровую трубу (кг/с), ρ - плотность воздуха в межтрубном канале (кг/м³), а ΔP - перепад давления на стенке жаровой трубы (Па).

Величина перепада давления на стенке жаровой трубы на практике колеблется в достаточно узких пределах (3...5% от давления за компрессором). Это связано с тем, что при низких значениях перепада ухудшается эффективность системы охлаждения первого соплового аппарата ТВД и протекание рабочего процесса в самой жаровой трубе. При более высоких значениях завышаются общие потери в КС. Поэтому, величиной перепада давления на стенке жаровой трубы можно предварительно задаться, принимая ее постоянной по всей длине жаровой трубы.

Если известны потери давления в диффузоре, то среднюю величину перепада давления на стенке жаровой трубы можно определить путем вычитания из общих потерь давления в КС (которые, как правило, являются заданной величиной), потерь в диффузоре.

На основании принятого допущения о постоянной величине перепада давления вдоль стенки жаровой трубы, эффективная площадь отверстий должна соответствовать ранее выбранному распределению расхода воздуха по зонам жаровой трубы. Тогда геометрическая площадь отдельных отверстий определится как отношение эффективной площади к коэффициенту расхода воздуха:

$$F_{geom} \sum = \frac{F_{ef}}{\mu_0}.$$

Для лопаточных завихрителей коэффициент расхода воздуха берётся по справочным или экспериментальным данным, а за геометрическую площадью принимается площадь самого узкого места в межлопаточном канале. Размеры отверстий системы охлаждения находятся по результатам теплового расчета жаровой трубы.

При определении размеров основных отверстий зоны горения и зоны разбавления конструктору приходится подбирать оптимальное соотношение между количеством отверстий, их размерами и формой с тем, чтобы обеспечить лучшее перемешивание воздуха с топливом или продуктами сгорания. Важной характеристикой в этом выборе является глубина про-

никновения струи воздуха в поток газов. В общем случае она зависит от располагаемого перепада статического давления на стенке жаровой трубы (или скорости воздушной струи), формы отверстия, профиля кромок, толщины стенки, угла наклона оси отверстия к направлению сносящего потока, скорости воздуха в межтрубном канале и скорости газа в жаровой трубе. Для струи воздуха, втекающей через круглое отверстие перпендикулярно к сносящему потоку, глубину проникновения можно определить по эмпирической формуле:

$$H = d_0 [0,3 + 0,415 (\frac{W_0}{W_{ж}})] (\frac{L}{d_0})^{0,63},$$

где L - длина, на которой глубина проникновения струи равна H (м), W_0 - скорость струи в отверстии (м/с), а $W_{ж}$ - скорость потока газов в жаровой трубе (м/с).

Скорость струи воздуха в отверстии определяется через эффективную площадь отверстия по формуле:

$$W_0 = \frac{G_{отв}}{\rho \mu_0 F_{geom}}.$$

Желательно, чтобы глубина проникновения струй воздуха (или отдельных струй), втекающих через основные отверстия зон горения и разбавления доходила как минимум до центра жаровой трубы, где происходит основной процесс горения и обычно наблюдается максимальная температура газов. Для повышения пробивной способности струй воздуха иногда используют направляющие втулки или патрубки.

После того, как будут определены размеры отверстий жаровой трубы, производится уточненный расчет аэродинамических характеристик КС с учетом горения и расчет теплового состояния стенки жаровой трубы, для чего в настоящее время широко используются программные пакеты.

3.3 Расчет температур элементов КС

Тепловые расчеты позволяют определить необходимый уровень температур стенки жаровой части для заданного временного и циклического ресурсов с учетом критериев эффективности и экономичности охлаждения при наиболее неблагоприятном сочетании внешних факторов (ухудшение параметров, экземплярный разброс, максимальная неравномерность температур и т.д.). Как правило, ресурсные и другие нерасчетные факторы учитываются запасом температуры ΔT_{ct} над предельно допустимой для выбранной марки материала стенки жаровой части:

$$T_{ct} = [T_{ct}] - \Delta T_{ct}.$$

В общем случае задача по определению температуры стенки жаровой трубы сводится к решению уравнения баланса тепловых потоков через стенку:

$$Q_{gkon} + Q_{gl} = Q_{hkon} + Q_{hl} = Q\delta,$$

где Q_{gkon} и Q_{hkon} - тепловые потоки от горячих газов к стенке и от стенки к холодному воздуху за счет конвективного теплообмена, Q_{gl} и Q_{hl} - лучистые тепловые потоки со стороны горячих газов и со стороны холодного воздуха, а $Q\delta$ - тепловой поток через стенку за счет теплопроводности.

Для расчета теплового и напряженного состояний конвективно-пленочной и ударно-пленочной систем охлаждения может быть использована специализированная программа, основанная на результатах аналитических и экспериментальных исследований. Исходными данными для расчета являются геометрические параметры, марка материала секции охлаждения, температура и давление охлаждающего воздуха и продуктов сгорания, коэффициент избытка воздуха и скорости потоков в районе секции.

Кроме этого предусмотрено два способа задания величины лучистого потока - либо устанавливается конкретное значение, либо программа «сама» определяет величину лучистого потока по заложенным в ней результатам измерений на двигателе. Если конструкция жаровой трубы и распределение в ней топлива существенно отличаются от применяемых на двигателе, а также при использовании других видов топлива, то интенсивность лучистого потока целесообразно задать конкретной величиной, определяемой экспертным или расчетным путем.

Для других типов конструкций системы охлаждения тепловой расчет выполняется по общим методикам расчета, изложенным в специальной литературе или с помощью универсальных программ. Так, результаты аэродинамического расчета КС с учетом горения, выполненные с помощью программного пакета моделирующего трехмерное течение, могут быть использованы в качестве граничных условий для расчета температуры стенки жаровой трубы.

Другой важной задачей при проектировании КС является определение теплового состояния ее наружного корпуса, который относится к основным силовым элементам двигателя.

Результаты тепловой оценки используются при оценке запасов прочности и прогнозировании ресурса корпуса по циклической долговечности. В связи с тем, что температура корпуса является инерционным параметром, для повышения качества прочностного расчета необходимо оценивать тепловое состояние корпуса с учетом нестационарности режима работы двигателя по полетному циклу.

3.4 Проектирование на заданную эмиссию

В связи с большим вниманием, уделяемым в последнее время проблеме экологической чистоты авиационных и наземных ГТД, одним из главных критериев, на который необходимо ориентироваться при проектировании КС, является требование по обеспечению заданных норм на эмиссию вредных веществ. В соответствии с международными стандартами и отечественными правилами в настоящее время для авиационных ГТД нормируется эмиссия HC , CO , NO_x и дыма. Нормируемым параметром эмиссии газобразных вредных веществ является условный валовый выброс каждого вещества, отнесенный к тяге двигателя на взлетном режиме (г/кН).

Эмиссия дыма нормируется по максимальному измеренному значению условного числа дымности. Валовый выброс каждого из вредных веществ определяется как сумма выбросов на режимах стандартного условного цикла взлетно-посадочных операций:

$$M = \sum EI G \tau,$$

где EI - индекс эмиссии (Emission Index) - масса вредного вещества, приходящаяся на 1 кг топлива (г/кг), G - расход топлива (кг/мин), а τ - время работы на i -ом режиме (мин).

Стандартный условный цикл взлетно-посадочных операций включает в себя следующие режимы:

- взлет - 100 % расчетной мощности, время работы на режиме 0,7 мин;
- набор высоты - 85 % расчетной мощности, время работы 2,2 мин;
- заход на посадку - 30 % расчетной мощности, время работы 4,0 мин;
- руление, малый газ - 7 % расчетной мощности, время работы 26 мин/

Окись углерода в большом количестве может образовываться вследствие нехватки кислорода для завершения реакции окисления углерода (обогащенная топливовоздушная смесь в первичной зоне), либо вследствие диссоциации CO_2 при высокой температуре (стехиометрическая или умеренно обедненная топливовоздушная смесь).

Значительную добавку к термодинамически равновесному CO дает неполное сгорание топлива. Именно этим можно объяснить тот факт, что максимальные концентрации CO образуются на режимах малой тяги, где температура газа в зоне горения относительно невелика. Таким образом, основными причинами высокого содержания CO в выхлопных газах могут быть:

- низкая скорость горения в первичной зоне вследствие недостатка топлива и (или) нехватки времени пребывания;
- недостаточно однородная топливовоздушная смесь, в результате чего образуются локальные обедненные зоны с низкой полнотой сгорания, а также зоны с большим избытком топлива;

- «замораживание» продуктов горения воздухом, участвующим в охлаждении стенки жаровой трубы.

Повышенное содержание несгоревших углеводородов, к которым относят топливо в виде капель или пара, а также продукты разложения исходного топлива на углеводороды меньшей молекулярной массы (метан, ацетилен), обычно связывают с плохим распыливанием топлива, недостаточной скоростью горения и «замораживанием» продуктов неполного сгорания в охлаждающем воздухе вблизи стенок жаровой трубы. С увеличением режима работы двигателя выбросы несгоревших углеводородов уменьшаются. Связано это как с улучшением распыливания топлива, так и с ростом скорости химических реакций в первичной зоне вследствие повышения давления и температуры воздуха на входе в КС.

Устранение причин образования СО и НС сводится, как правило, к повышению полноты сгорания топлива на режимах вблизи малого газа.

NO_x образуются в результате окисления азота, находящегося в атмосферном воздухе и в топливе. Легкие дистиллятные топлива содержат небольшие количества органического азота (менее 0,06 %), в то время как тяжелые продукты перегонки могут содержать до 1,8 %. В последнем случае доля NO из топлива может составлять значительную долю в общем выбросе окиси азота.

Процесс образования окиси азота эндотермичен и идет с заметной скоростью только при температурах выше 1800 К, поэтому NO образуется только в горячих зонах и достигает максимальной концентрации на режиме наибольшей тяги. Окисление NO до NO₂ происходит при снижении температуры газа. Практический диапазон температуры газа, при которой образуется двуокись азота - от 400 до 900 К.

На режимах большой тяги доля NO₂ в окислах азота NO_x (NO_x = NO + NO₂) очень мала, но на режиме малого газа она может достигать 50 %.

Установлено, что выброс NO_x экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени и линейно возрастает с повышением времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах.

Сажа (или дым) может образовываться в любой части зоны горения, где имеется избыток топлива и скорость смешения недостаточна. Например, в случае центробежных форсунок основная сажеобразующая область располагается внутри факела распыливания. В этой области существует возвратное течение продуктов сгорания и локальные порции паров топлива оказываются окруженными высокотемпературными газами с дефицитом кислорода. Большая часть сажи, образовавшейся в первичной зоне горения, сгорает затем в высокотемпературных областях ниже по потоку. Экспериментально установлено, что на образование сажи оказывают влияние свойства топлива, давление и температура воздуха в КС, коэффициент

избытка воздуха, качество распыливания топлива и способ подачи топлива в КС. Так, склонность к сажеобразованию возрастает при уменьшении содержания в топливе водорода, а также при повышении концентрации в топливе полициклических ароматических углеводородов.

С увеличением давления в КС сажеобразование существенно возрастает. Связано это с тем, что расширяются пределы горения и сажа начинает образовываться в тех областях, где при низких давлениях эти области были бы слишком обогащенными для горения. Кроме этого, повышенное давление ускоряет химические реакции и тем самым приводит к более раннему инициированию горения и к увеличению доли топлива, сгорающего в обогащенных областях.

Увеличение температуры воздуха на входе в КС чаще всего приводит к усилению сажеобразования, особенно при наличии обогащенных зон. Повышение температуры газа на выходе из камеры уменьшает сажеобразование благодаря увеличению области выгорания сажи в зоне смешения.

Для обеспечения минимального уровня эмиссии вредных веществ при организации процесса горения в КС любого типа необходимо обеспечить следующие условия:

- достаточно мелкое дробление частиц топлива;
- высокую однородность смеси перед подачей в КС;
- максимально возможную скорость реакции;
- температуры в зоне горения 700...1500 °С;
- отсутствие локальных высокотемпературных зон;
- постоянного во всем диапазоне работы двигателя состава смеси в зоне горения;
- оптимальное распределение вторичного воздуха;
- оптимальный состав смеси в смесительных устройствах или в первичной зоне КС.

Большинство способов снижения вредных выбросов в КС традиционных схем по существу являются компромиссом между выбросом СО и НС с одной стороны и выбросом NO_x – с другой. В то же время, для обеспечения перспективных норм на эмиссию вредных веществ, необходимо создание КС, которые бы позволили одновременно снизить все виды вредных компонентов. К основным конструктивным схемам низкоэмиссионных КС можно отнести следующие схемы:

- двухзонные;
- изменяемой геометрии;
- многофорсуночные;
- с гомогенизацией топливовоздушной смеси;
- каталитические.

Принцип действия всех низкоэмиссионных КС так или иначе основан на поддержании температуры в зоне (зонах) горения в достаточно узком

интервале на всех эксплуатационных режимах двигателя.

3.4.1 Двухзонная КС

Дежурная зона этой КС (внутренняя зона) оптимизирована в отношении высокой полноты сгорания и низких выбросов СО и НС на режимах близких к малому газу, тогда как основная зона создает бедную смесь, оптимальную в отношении выброса NOx на режимах большой мощности. Дежурная зона обеспечивает также устойчивость горения основной зоны при ее подключении. К недостаткам двухзонной КС можно отнести сложность обеспечения ее надежной работы на переменных режимах работы двигателя, когда требуется быстрое отключение или подключение основной зоны.

В конструкции КС изменяемой геометрии постоянство коэффициента избытка воздуха в первичной зоне обеспечивается применением элементов, позволяющих регулировать распределение воздуха в жаровой трубе. На режимах максимальной тяги значительная часть воздуха подается в первичную зону для того, чтобы минимизировать образование сажи и NOx. При снижении тяги двигателя все увеличивающаяся доля воздуха направляется в зону разбавления, тем самым удерживается высокая температура в первичной зоне и обеспечивается низкий уровень выбросов СО и НС.

3.4.2 Многофорсуночная КС

Снижение эмиссии вредных веществ в многофорсуночных КС достигается за счет уменьшения размеров локальных зон с высокой температурой горения. В этой КС форсуночные модули расположены в два ряда – по 36 модулей в каждом ряду. Для компенсации тепловых расширений наружная и внутренняя стенки жаровой трубы имеют телескопическое соединение с первым сопловым аппаратом. Высокая однородность поля температур газа перед турбиной обеспечивается благодаря применению смесительных патрубков в зоне разбавления. Усилия от расположенной под КС опоры ротора передаются на наружную подвеску двигателя с помощью пустотелых силовых стоек, связывающих внутренний и наружный корпуса КС.

3.4.3 КС с гомогенизацией рабочей смеси

В КС с гомогенизацией рабочей смеси в первичную зону подается топливо, предварительно испаренное и полностью перемешанное с воздухом. При этом существенно сокращается время, необходимое для полного сгорания топлива. Низкую температуру пламени поддерживают за счет обеднения топливовоздушной смеси. В то же время на режимах малой мощности

смесь может оказаться слишком обедненной для устойчивого горения. Поэтому данный подход, как правило, требует организации дежурного пламени и (или) регулирования распределения воздуха. Другим недостатком такой КС является вероятность самовоспламенения топлива в устройствах подготовки смеси или проскок пламени на режимах с высокими параметрами воздуха на входе в КС.

Другим способом снижения температуры пламени при сжигании гомогенной топливовоздушной смеси является ее обогащение. При этом практически исключается проскок пламени в устройство подготовки смеси. К недостаткам этого способа можно отнести то, что он, во-первых, требует организации в зоне разбавления быстрого перевода продуктов сгорания с избытком топлива в обедненную смесь, что на практике реализовать довольно сложно. Во-вторых, обогащенная первичная зона склонна к нагарообразованию.

3.4.4 Каталитические КС

В каталитических КС для повышения скорости горения и снижения температуры продуктов сгорания используются катализаторы. В таких камерах одна часть топлива поступает через форсунки и предварительно смешивается с воздухом. Подготовленная однородная топливовоздушная смесь с заданным соотношением топлива к воздуху проходит через катализатор. Проходя через катализатор, топливовоздушная смесь конвертируется в синтез-газ, который имеет повышенную температуру и включает в себя такие горючие компоненты как H_2 и CO. Синтез-газ догорает в зоне горения за катализатором вместе с другой частью топлива, подаваемой в эту зону, минуя катализатор.

В присутствии катализатора реакция окисления топлива является специфическим квантохимическим процессом получения тепла в виде излучения инфракрасных квантов. Реакция протекает через несколько последовательных стадий по более выгодному пути, что позволяет проводить процесс с большей скоростью. Важнейшим фактором каталитической технологии беспламенного сжигания топлива является то, что она позволяет проводить реакцию без вовлечения в реакцию нейтрального N_2 . Эффект обосновывается наличием в процессе каталитических реакций магнитно-газоселективной адсорбции O_2 и выталкиванием N_2 из зоны реакции. Область применения каталитических реакторов в настоящее время ограничена по причине сложности создания катализаторов с большой мощностью тепловыделения и работающих при высоких термических нагрузках.