

УДК 629.7.036.34

И. Ф. КРАВЧЕНКО, Д. В. КОЗЕЛ*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЗАПУСКА ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ВЫСОТНО-СКОРОСТНОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИМЕНЕНИЯ САМОЛЕТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТРДДФ РАЗРАБОТКИ ГП «ИВЧЕНКО-ПРОГРЕСС» НА СТЕНДЕ В ТЕРМОБАРОКАМЕРЕ

Проведен комплекс испытаний турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания АИ-322Ф на стенде в термобарокамере. Испытания двигателя выполнялись в КНР при участии украинских специалистов, целью испытаний было определение характеристик работы двигателя во всех высотно-скоростных условиях эксплуатации самолета, в том числе области запуска форсажной камеры сгорания и проверка ее стабильной работы. Программа испытаний двигателя в термобарокамере выполнена в полном объеме, в процессе проведения комплекса испытаний выполнялась доводка двигателя и алгоритмов управления форсажной камерой сгорания. В результате обеспечен запуск форсажной камеры и ее устойчивая работа во всем высотно-скоростном диапазоне эксплуатации согласно техническому заданию на двигатель.

Ключевые слова: форсажная камера сгорания, термобарокамера, область запуска, огневая дорожка, наличие пламени.

Введение

В настоящее время на мировом рынке имеется большой спрос на современные учебно-тренировочные и легкие боевые самолеты (УТС и ЛБС), поскольку используемые ранее реактивные самолеты для подготовки летного состава по тактико-техническим характеристикам уступают боевым самолетам. Соответственно задача создания современных и высокоэффективных двигателей для УТС и ЛБС является актуальной и востребованной. Поэтому большую перспективу и особый интерес для авиационной промышленности и всей авиационной отрасли Украины представляет создание семейства двигателей для УТС и ЛБС [1]. Данное семейство включает в себя также турбореактивные двухконтурные двигатели с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ).

ГП «Ивченко-Прогресс» в кооперации с другими предприятиями впервые в Украине был разработан ТРДДФ АИ-322Ф для сверхзвукового УТС L-15, разработчик самолета – компания Hongdu, КНР. Задача создания двигателя с форсажной камерой сгорания (ФКС) является новой для украинских двигателестроителей и ее решение потребовало проведения большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

После разработки и изготовления первых экземпляров ТРДДФ АИ-322Ф на ГП «Ивченко-Прогресс» был проведен комплекс работ по исследованию и доводке характеристик двигателя и его систем в условиях наземного стенда. С целью проведения дальнейшего этапа доводки и подготовительных работ к сертификации двигателя, в период с 2014 г. по 2016 г. совместно с китайскими специалистами проведен комплекс испытаний двигателя АИ-322Ф на стенде в термобарокамере (ТБК).

Одной из задач испытаний двигателя АИ-322Ф на стенде в ТБК было обеспечение и подтверждение надежного запуска и устойчивой работы ФКС, в том числе на «левой» границе высотно-скоростного диапазона эксплуатации самолета (включение форсированных режимов работы двигателя при минимальных скоростях полета самолета на максимальных высотах).

В процессе проведения испытаний двигателя в ТБК выполнена доводка характеристик и параметров двигателя во всех высотно-скоростных условиях, в результате подтверждена работоспособность двигателя, в том числе подтверждены надежный запуск и устойчивая работа ФКС во всем высотно-скоростном диапазоне эксплуатации самолета.

Описание двигателя АИ-322Ф и системы запуска ФКС

ТРДДФ АИ-322Ф выполнен по двухвальной схеме и состоит из вентилятора, компрессора высокого давления, основной камеры сгорания, турбины высокого давления, турбины низкого давления, на-

ружного корпуса двигателя и ФКС с регулируемым реактивным соплом. Форсажная камера сгорания – со смешением потоков, состоит из диффузора форсажной камеры, топливных коллекторов с форсунками, стабилизаторов пламени и корпуса с теплозащитными экранами. Схема ФКС показана на рисунке 1.

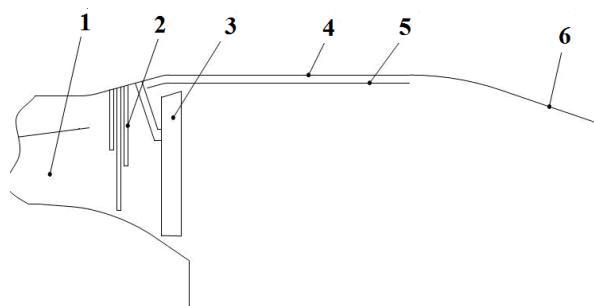


Рис. 1. Схема форсажной камеры сгорания двигателя АИ-322Ф:

- 1 – диффузор ФКС; 2 – топливный коллектор с форсунками; 3 – стабилизатор пламени; 4 – корпус ФКС; 5 – теплозащитный экран; 6 – регулируемое реактивное сопло

ФКС для двигателя АИ-322Ф была спроектирована на основании разработанных требований к её основным характеристикам, технологичности, ремонтпригодности и других критериев качества, а также требований к смежным узлам и системам [2].

Конструкция ФКС должна обеспечивать следующие основные требования:

- надежный запуск форсажной камеры во всех условиях эксплуатации двигателя при обеспечении минимального времени запуска;
- устойчивость процесса горения топлива в ФКС во всем высотном-скоростном диапазоне полета самолета для всех возможных допустимых режимов работы двигателя и эволюций самолета;
- отсутствие вибрационного горения во всем высотном-скоростном диапазоне эксплуатации, возникновение которого ведет к разрушению элементов конструкции двигателя;
- требуемое время приемистости и сброса на форсированных режимах работы двигателя;
- работоспособность в течение ресурса и возможность ремонта ФКС после выработки ресурса;
- безопасную эксплуатацию двигателя в составе самолета.

В мировой практике для запуска ФКС применяются следующие основные системы запуска:

- самовоспламенение топлива (для ФКС турбореактивных двигателей при температуре газа за турбиной более 950 °С);
- центральная форкамера;
- периферийный воспламенитель;

- “огневая дорожка”;
- каталитический воспламенитель.

Из числа указанных систем запуска ФКС турбореактивных двигателей для двигателя АИ-322Ф была выбрана система “огневая дорожка”. По опыту применения многими фирмами разработчиками турбореактивных двигателей данная система запуска ФКС обеспечивает высокую надежность запуска во всех условиях эксплуатации и минимальное время перехода двигателя на форсированные режимы работы. К тому же, применение системы “огневая дорожка” позволяет выполнять запуск ФКС при минимальных начальных расходах пускового топлива в ФКС, что в свою очередь приводит к минимальному влиянию процесса запуска ФКС на параметры работы двигателя и его газодинамическую устойчивость.

Функционирование системы “огневая дорожка” основано на принципе дозированного впрыска топлива в основную камеру сгорания двигателя и организации локального высокотемпературного факела в потоке рабочего тела за турбиной на входе в ФКС в области стабилизаторов пламени.

При проектировании двигателя АИ-322Ф с целью определения оптимального места расположения форсунки системы “огневая дорожка” и траекторных характеристик нестационарного потока газа в тракте турбины решалась задача определения пространственной ориентации газотопливного факела в основной камере сгорания, турбине и на входе в ФКС [3]. Данная задача была решена с помощью трехмерного численного моделирования нестационарного течения вязкого, теплопроводного газа, по результатам решения определялись конструктивные характеристики системы “огневая дорожка”.

Дозирование топлива для системы “огневая дорожка” обеспечивается соответствующим агрегатом, который питается от топливной системы двигателя форсажного контура. Время впрыска топлива в основную камеру сгорания форсункой системы “огневая дорожка” выбиралось из условия обеспечения надежного запуска ФКС и отсутствия негативного влияния на ресурс деталей конструкции двигателя. Схема системы запуска ФКС “огневая дорожка” показана на рисунке 2.

Для контроля процесса горения топлива в ФКС используется ионизационный датчик наличия пламени в ФКС. Сигнал о наличии пламени в ФКС, регистрируемый системой автоматического управления двигателем, используется в алгоритмах управления двигателем при запуске и работе ФКС.

При проектировании двигателя АИ-322Ф расчетно-аналитическим методом были определены законы подачи топлива в систему “огневая дорожка” и пускового топлива в ФКС, а также алгоритмы за-

пуска ФКС для всего диапазона условий эксплуатации двигателя в составе самолета. После изготовления первых экземпляров двигателей на стенде ГП “Ивченко-Прогресс” в земных условиях проводились экспериментально-доводочные работы, в результате которых были скорректированы разработанные законы и алгоритмы запуска ФКС для обеспечения надежного запуска ФКС в земных условиях и требуемого времени приемистости при переходе на форсированные режимы. Также выполнена оптимизация законов и алгоритмов запуска ФКС для всего диапазона условий эксплуатации.

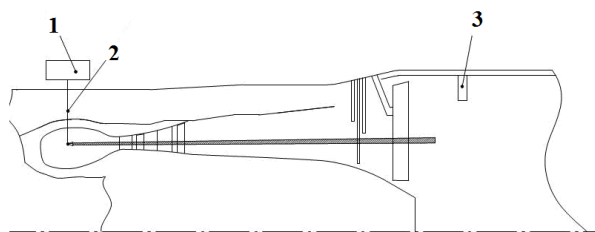


Рис. 2. Схема системы запуска ФКС “огневая дорожка” двигателя АИ-322Ф:

1 — агрегат “огневой дорожки”; 2 — форсунка “огневой дорожки”; 3 — датчик наличия пламени

Испытания на стенде в ТБК

Комплекс испытаний двигателя АИ-322Ф на стенде в ТБК проводился в КНР при участии украинских специалистов. Целью испытаний было определение характеристик работы двигателя во всем высотно-скоростном диапазоне эксплуатации самолета, в том числе области запуска форсажной камеры сгорания и проверка ее стабильной работы.

Стенд ТБК обеспечил имитацию всех условий высотно-скоростного диапазона эксплуатации двигателя АИ-322Ф.

Область эксплуатации самолетов с ТРДДФ имеет весьма широкий диапазон высотно-скоростных условий. Поэтому надежный запуск ФКС и быстрый переход на форсированные режимы работы двигателя с более низких режимов, в том числе и с режима малого газа, происходят при существенно отличающихся давлениях и температурах потока воздуха и газа на входе в ФКС. Параметры рабочего тела на входе в ФКС в условиях больших высот и скоростей возможно смоделировать при испытаниях двигателя в земных условиях и тем самым проверить работу законов и алгоритмов управления при запуске ФКС для этих условий на земном стенде. Наиболее “тяжелыми” условиями для запуска ФКС являются низкие значения давления и температуры рабочего тела на входе в ФКС, которые реализуются на “левой” границе высотно-скоростного диапазона эксплуатации самолета при боль-

ших высотах и малых скоростях полета. К тому же, параметры в ФКС в условиях “левой” границы высотно-скоростной области невозможно смоделировать при испытаниях двигателя в условиях земного стенда. Поэтому особое внимание при испытаниях двигателя в ТБК было уделено обеспечению надежного запуска ФКС на “левой” границе высотно-скоростного диапазона эксплуатации в соответствии с требованиями технического задания на двигатель.

Методика и порядок проведения испытаний двигателя в ТБК согласовывались украинскими и китайскими специалистами с целью оптимизации затрат ресурсов при испытаниях, оперативного анализа результатов испытания и возможности доводки двигателя для обеспечения требований технического задания. Для проверки надежности запуска ФКС выполнялось не менее трех включений форсированных режимов работы двигателя для каждого режима моделирования условий на входе в двигатель при работе в ТБК.

Перед постановкой в ТБК на двигателе было выполнено дополнительное препарирование для измерения параметров. Системами стенда в ТБК была организована регистрация штатных параметров измерения и параметров измерения по дополнительному препарированию с выводом на экран монитора в режиме реального времени и записью их на носитель информации. Также, на стенде в ТБК было выполнено моделирование взаимодействия систем двигателя с самолетными системами, что позволило организовать полное моделирование условий работы двигателя, как, например, отборы мощности и воздуха от двигателя на нужды самолета.

В ходе испытаний в случае отсутствия запуска ФКС выполнялся оперативный анализ результатов измерения параметров, по результатам анализа вводились регулировки в программном обеспечении (ПО) блока системы автоматического управления двигателем для корректировки законов и алгоритмов управления ФКС на запуске и управления двигателем в целом. Регулировки вводились на работающем двигателе без останова двигателя и без выключения работы ТБК.

На начальном этапе испытаний при проверке запуска на “левой” границе области не удалось запустить ФКС для высот полета $H_{П} > 11$ км. В дальнейшем, при выполнении комплекса испытаний двигателя в ТБК по результатам анализа данных испытаний выполнялась корректировка и вводились регулировки в ПО системы регулирования двигателем, что позволило обеспечить надежный запуск ФКС на всей “левой” границе области, в том числе и для $H_{П} > 11$ км.

При корректировках ПО и вводе новых регулировок уточнялись и оптимизировались законы и алгоритмы управления системой “огневая дорожка”, подачи пускового и основного топлива в ФКС, а также реактивным соплом.

Проверки запуска ФКС при испытаниях в ТБК при больших скоростях полета для всего диапазона высот, а также для земных условий при нулевой скорости полета и температуре воздуха на входе в двигатель минус 40 °С подтвердили надежность запуска ФКС и доводка не потребовалась.

В процессе проведения испытаний также были оптимизированы алгоритмы управления пусковым и основным топливом в ФКС, что позволило обеспечить “мягкий” запуск ФКС с минимальным негативным влиянием на газодинамическую устойчивость двигателя в процессе запуска ФКС и требуемое время приемистости и сброса на форсированных режимах работы двигателя.

Разработанные алгоритмы управления и конструкция обеспечили надежный запуск и устойчивую работу ФКС во всем высотно-скоростном диапазоне эксплуатации. Результаты определения области запуска ФКС представлены на рисунке 3, сплошной линией показано требование технического задания на двигатель в части области запуска ФКС.

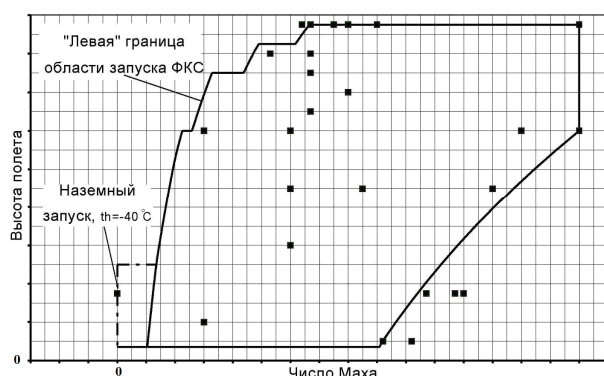


Рис. 3. Область запуска ФКС для высотно-скоростных условий эксплуатации двигателя

Суммарная наработка двигателя за весь комплекс испытаний в ТБК составила более 68 часов, выполнено более 340 включений ФКС. Состояние узлов и деталей ФКС после испытаний двигателя в ТБК удовлетворительное.

Заключение

Проведены испытания ТРДДФ АИ-322Ф на стенде в ТБК.

Испытательный стенд с ТБК обеспечил имитацию всех условий высотно-скоростного диапазона

эксплуатации двигателя АИ-322Ф, запланированный объем испытаний выполнен полностью.

В результате испытаний подтверждена правильность конструктивных решений, разработанных при проектировании ФКС и ее систем, обеспечено требование технического задания на двигатель в части области запуска ФКС в высотно-скоростном диапазоне эксплуатации самолета.

После проведения испытаний в ТБК запланированы стендовые и летные сертификационные испытания двигателя, в настоящее время проводятся работы по подготовке двигателя АИ-322Ф к сертификации.

Литература

1. Кравченко, И. Ф. Создание семейства мало-размерных газотурбинных двигателей на базе единого газогенератора [Текст] / И. Ф. Кравченко, М. А. Киричков, А. В. Еланский // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2013. — № 10 (107). — С. 37-41.

2. Кравченко, И. Ф. Формирование конструктивно и параметрического облика форсажной камеры. Определение параметров затурбинного диффузора [Текст] / И. Ф. Кравченко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. — Харьков, 2014. — Вып. 4. — С. 18-27.

3. Кравченко, И. Ф. Определение траекторных характеристик нестационарного потока газа в турбине авиационного двигателя [Текст] / И. Ф. Кравченко, В. М. Лапотко, Ю. П. Кухтин // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2008. — № 10 (57). — С. 93-95.

References

1. Kravchenko, I. F., Kirichkov, M. A., Elanskii, A. V. Sozdanie semeistva malorazmernykh gazoturbinnnykh dvigatelei na baze edinogo gazogeneratora [Developing a small-size family of gas turbine engine based on single core]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 10 (107), pp. 37-41.

2. Kravchenko, I. F. Formirovanie konstruktivnogo i parametricheskogo oblika forsazhnoi kamery. Opredelenie parametrov zaturbinnogo diffuzora [Shaping of design and parametric concept of the afterburner. Determination of exhaust diffuser parameters]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksii letatel'nykh apparatov*, 2014, no. 4(80), pp. 18-27.

3. Kravchenko, I. F., Lapotko, V. M., Kukhtin, Yu. P. Opredelenie traektornykh kharakteristik nestatsionarnogo potoka gaza v turbine aviatsionnogo dvigatelya [Determination of trajectory characteristics of variable gas flow in the air-engine turbine]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 93-95.

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ ЗАПУСКУ ФОРСАЖНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ
В ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ ВИСОТНО-ШВИДКІСНОМУ ДІАПАЗОНІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТАКА
ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ТРДДФ РОЗРОБКИ ДП "ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС"
НА СТЕНДІ В ТЕРМОБАРОКАМЕРІ**

І. Ф. Кравченко, Д. В. Козел

Проведено комплекс випробувань турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою згоряння AI-322F на стенді в термобарокамері. Випробування двигуна виконувалися в КНР за участю українських спеціалістів, метою випробувань було визначення характеристик роботи двигуна у всіх висотно-швидкісних умовах експлуатації літака, у тому числі області запуску форсажної камери згоряння і перевірка її стабільної роботи. Програма випробувань двигуна в термобарокамері виконана в повному обсязі, в процесі проведення комплексу випробувань виконувалося доведення двигуна і алгоритмів управління форсажною камерою згоряння. В результаті забезпечений запуск форсажної камери і її стійка робота у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації згідно технічного завдання на двигун.

Ключові слова: форсажна камера згоряння, термобарокамера, область запуску, вогняна доріжка, наявність полум'я.

**AFTERBURNER STARTING RANGE TESTING FOR AIRCRAFT ALTITUDE-VELOCITY
OPERATIONAL CONDITIONS DURING THE TEST OF SE "IVCHENKO-PROGRESS"
DEVELOPED ENGINE IN THE CLIMATIC TEST BENCH**

A complex test of turbojet engine with afterburner AI-322F was preformed in the climatic test bench. Engine test was carried out in China with the participation of the Ukrainian specialists. The aim of the test was to determine the characteristics of operation of the engine in all of altitude-velocity operating conditions of the aircraft, including the afterburner starting range, and to check its stable operation. The program of tests of the engine in climatic test bench is performed in full, in the course of the tests complex refinement of engine and afterburner control algorithms are performed. As a result infallible start of the afterburner and its stable performance throughout the altitude-velocity operation range are provided according to the engine technical specification.

Key words: afterburner, climatic test bench, starting range, hot streak, presence of flame.

Кравченко Игорь Федорович – д-р техн. наук, академик Инженерной академии наук Украины, директор предприятия, Директор-Генеральный конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: IFKravchenko@ivchenko-progress.com.

Козел Дмитрий Викторович – магистр, ведущий конструктор, руководитель расчетно-экспериментальной группы отдела камер сгорания, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03503@ivchenko-progress.com.

Kravchenko Igor Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Academician of the Engineering Academy of Sciences of Ukraine, Director-Designer General, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: IFKravchenko@ivchenko-progress.com.

Kozel Dmitry Viktorovich – master, chief designer, head of design-experimental group of the combustion chambers department, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03503@ivchenko-progress.com.