

УДК 621.452.322.017

doi: 10.32620/aktf.2019.7.14

**А. В. ШЕРЕМЕТЬЕВ***ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО МЕТОДА  
УСТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

*Приведено экспериментальное подтверждение правомерности использования ретроспективного метода установления ресурсов основных деталей авиационных ГТД. Данные двадцати двухлетней эксплуатации ГТД с большой степенью двухконтурности и сравнение полученных результатов с результатами эксплуатации зарубежных двигателей такого же класса показывают хорошее совпадение. Это свидетельствует о достоверности разработанного ретроспективного метода установления ресурсов в ГП «Ивченко-Прогресс» и о целесообразности дальнейшего применения этого метода. В настоящее время перед инженерами авиационных компаний стоит цель: «...цель состоит в том, чтобы сделать за один год ту же работу по созданию авиационных двигателей, которая делалась ранее за пять лет и потратить 1 миллиард долларов на работу, на которую в прошлом тратили 6 или 7 миллиардов долларов». Для достижения такой цели мы должны изменить методологию создания авиационных ГТД. Для уменьшения времени и затрат на создание, доводку и сертификацию необходимо создать новый метод обеспечения прочностной надежности, достигающий высокого уровня достоверности результатов в сочетании с приемлемыми затратами времени и денег. Улучшение методов обеспечения прочностной надежности на основе анализа прочности и экспериментально-исследовательских работ, которые были проведены ранее, опыта доводки и эксплуатации конструктивно подобных деталей двигателя-прототипа делают возможным уменьшение времени и затрат на создание, доводку и сертификацию новых авиационных ГТД. Использование концепции конструктивного подбора в сочетании с опытом создания, доводки и сертификации авиационных ГТД при наличии современной мощной вычислительной техники и программного обеспечения для определения термомеханического напряженно-деформируемого состояния деталей делает возможным успешное решение задачи обеспечения прочностной надежности деталей в условиях комплексного многофакторного нагружения. В этом случае возможно достижение значительной экономии затрат и времени, включая также и период установления ресурсов. Успешная эксплуатация двигателей с высокой степенью двухконтурности в пределах установленного ресурса основных деталей с использованием ретроспективного метода подтверждают его достоверность и преимущества перед другими методами установления ресурсов.*

**Ключевые слова:** ретроспективный метод; большая степень двухконтурности; зарубежные двигатели; достоверность; ресурс; эксплуатация авиационных ГТД; механизмы разрушения деталей.

**Введение**

Проектирование, доводка и сертификация авиационного газотурбинного двигателя в связи с проведением комплекса экспериментальных работ требуют больших материальных затрат и длительных календарных сроков, исчисляемых годами.

Уменьшение затрат и сокращение сроков создания авиационных ГТД приводит к уменьшению стоимости одного часа жизненного цикла, повышению конкурентоспособности двигателя, к уменьшению времени компенсации капитальных вложений.

Сокращение затрат на создание авиационных ГТД практически напрямую связано с использованием опыта и квалификации инженерного и рабочего состава фирм – разработчиков.

Обострение конкурентной борьбы и происходящая глобализация рынка производителей авиаци-

онной газотурбинной техники диктуют существенно более жесткие требования к разработчикам.

Запорожская двигателестроительная фирма ГП «Ивченко-Прогресс» в середине 80-х годов прошлого столетия оказалась в условиях открытого мирового рынка практически без всякой поддержки со стороны государства и при отсутствии отраслевых институтов, обеспечивающих опережающие разработки.

**1. Формулирование проблемы**

В настоящее время, например, как заявляют представители разработчиков коммерческих самолётов Boeing: «...цель состоит в том, чтобы перейти от 60-месячного цикла создания изделия к 12-месячному и сделать за 1 млрд. долларов то, что мы сделали последний раз за 6 или 7 млрд. долларов» [1].

Конструкторское бюро ГП «Ивченко-Прогресс» поняло необходимость сокращения затрат и времени на создание двигателей на 20 лет раньше.

В этих условиях должна кардинально измениться методология создания авиационных ГТД. Эта методология должна обеспечивать максимально быстрое реагирование на конъюнктуру рынка, получение конкурентоспособных технических, экономических и эксплуатационных показателей двигателей, в том числе надёжности и максимального ресурса с самого начала эксплуатации, в кратчайшие сроки и при минимальных затратах на разработку.

Для уменьшения сроков и сокращения материальных затрат при разработке и сертификации двигателя, необходимо создание и внедрение новых методов обеспечения прочностной надёжности, позволяющих достигать высокого уровня достоверности результатов в сочетании с приемлемыми затратами времени и материальных средств.

Существующие сегодня технологии виртуальной разработки и сопровождения изделий позволяют моделировать процессы, происходящие в авиационных ГТД. В том числе и прогнозировать основные механизмы разрушения деталей. Использование методов ресурсного проектирования обеспечивает достаточную прочностную надёжность деталей авиадвигателей.

Совершенствование методов обеспечения прочностной надёжности на основе выполнения прочностного анализа и исследований проведенных ранее экспериментальных работ, опыта доводки и опыта эксплуатации конструктивно подобных деталей в составе двигателей-прототипов позволяет сокращать сроки создания и уменьшать затраты при разработке, доводке и сертификации новых авиационных ГТД.

Детали авиационных ГТД работают в условиях одновременного развития всех основных механизмов разрушения [2] при действии многочисленных факторов нагружения, что делает трудным установление и использование критериев прочности и долговечности.

## 2. Решение проблемы

Использование концепции конструктивного подобия в сочетании с опытом создания, доводки и сертификации авиационных ГТД, при наличии современной мощной вычислительной техники и сертифицированных пакетов прикладных программ для определения термомеханической напряженности деталей позволяет успешно решать задачу обеспечения прочностной надёжности деталей в условиях комплексного многофакторного нагружения. При

этом достигается существенная экономия материальных затрат и сокращение календарных сроков, в том числе при установлении ресурсов.

Конструктивное подобие – это один из видов приближённого подобия, при котором оригинал и модель выполняют сходные функции, реализуют сходные физические процессы в составе авиационного ГТД, имеют однотипные факторы термомеханического и вибрационного нагружения, одинаковое математическое описание напряженно-деформированного и теплового состояния и изготовлены из родственных материалов.

Конструктивное подобие – это общее свойство деталей, которое позволяет использовать опыт доводки, испытаний и эксплуатации деталей – прототипов для обеспечения прочностной надёжности деталей вновь создаваемых авиационных ГТД. Если две детали являются конструктивно подобными, то прочностная надёжность одной из деталей может быть использована для обоснования прочностной надёжности другой. Первую из этих деталей будем называть прототипом (моделью), а вторую – проектом (оригиналом) [3].

Принцип конструктивного подобия состоит в том, что конструктивное подобие служит основой для сравнения параметров прочностной надёжности деталей авиационных ГТД. Сравнение (определение) параметров прочностной надёжности желательно выполнять только среди конструктивно подобных деталей (диск с диском, вал с валом, лопатка вентилятора с лопаткой вентилятора и т. п.).

Концепция конструктивного подобия заключается в возможности использования принципа конструктивного подобия для обеспечения статической, динамической прочности, обеспечения ресурса и подтверждения работоспособности деталей вновь создаваемых авиационных ГТД.

Решение задачи, направленной на сокращение сроков и затрат на разработку новых авиационных двигателей привело к созданию ретроспективного метода установления ресурсов.

Базовыми факторами, сделавшими возможным создание этого метода являлись:

1. Уже зарождавшимися технологиями виртуальной разработки двигателей, которые позволяли моделировать процессы, происходящие в авиационных ГТД. В том числе и прогнозировать основные механизмы разрушения деталей.

2. Наличие значительного количества серийно эксплуатируемых двигателей – прототипов, а, следовательно, и большого опыта создания, доводки и сертификации двигателей.

3. Наличие имевшегося опыта наработки двигателей в процессе ЭЦИ на стендах и летной эксплуатации.

Таблица 1

Ресурсы основных деталей двигателей CF6-50 и ТРДД ГП «Ивченко-Прогресс»

Деталь	CF6-50, цикл	ТРДД1 ГП «Ивченко-Прогресс», цикл	ТРДД2 ГП «Ивченко-Прогресс», цикл
Диск вентилятора	20800	>10000	30000...40000
Лопатка вентилятора	25000	>10000	20000...40000
Диски КВД	11500... 20000	7540... 20000	15000...40000
Диски (Диск) ТВД	6750... 15000	>10000	14000...16000
Диски ТНД (ТВ)	25000	11000... 20000	30000...40000
Валы ротора ВД	18000	>6500	15000...23000
Валы ротора НД	11500... 30000	>20000	20000...26000

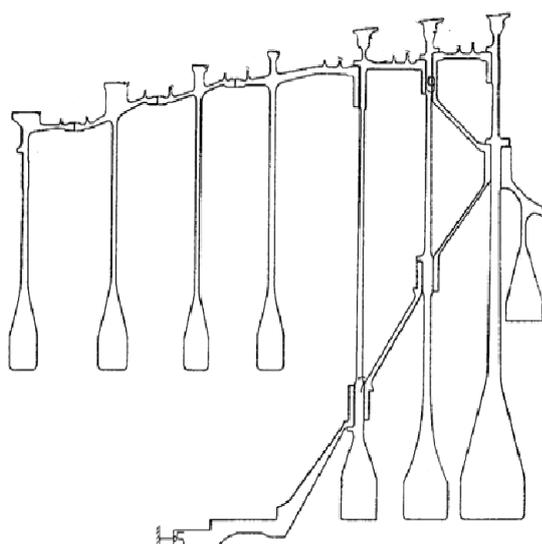


Рис.1. Ротор КВД нового двигателя

4. Наличие опытных, квалифицированных конструкторов, газодинамиков, прочнистов, металлургов, технологов, испытателей, исследователей.

5. Наличие в достаточном количестве средств вычислительной техники и программного обеспечения.

Основным стимулом к созданию методологии обеспечения прочностной надежности деталей ГТД на основе использования концепции конструктивного подобию служило желание фирмы выжить в условиях жесткой конкурентной борьбы с другими разработчиками авиационных двигателей.

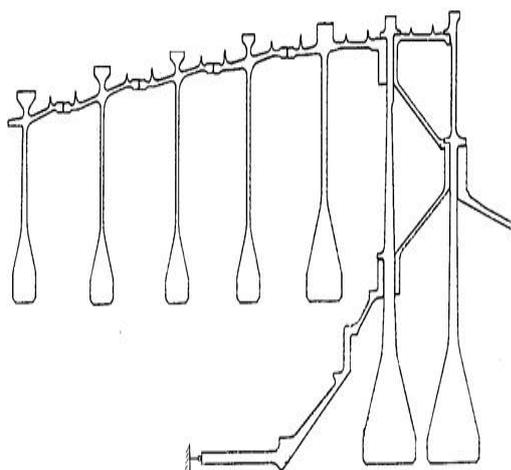


Рис. 2. Ротор КВД двигателя-прототипа

Установленные циклические ресурсы основных деталей двигателя с большой степенью двухконтурности находятся на одном уровне с циклическими ресурсами деталей зарубежных авиационных двигателей (таблица 1 [4]).

Допускаемый циклический ресурс в полетных циклах для детали нового двигателя (рис.1) может быть определен по ресурсу аналогичной детали двигателя-прототипа (рис. 2).

В настоящее время, спустя 22 года со времени начала эксплуатации рассматриваемые двигатели большой степени двухконтурности, у которых ресурсы основных деталей установлены ретроспективным методом, продолжают успешную эксплуатацию.

Наработка отдельных экземпляров двигателей превышает 5500...8000 полетных циклов. Время пребывания двигателей на крыле составляет 1300...8000 полетных циклов в зависимости от плеча полета самолета, так же как у лучших зарубежных двигателей (таблица 2).

Двигатели эксплуатируются по третьей стратегии управления ресурсами, что предусматривает эксплуатацию по техническому состоянию.

Регулярно проводимые инспекции технического состояния двигателей-лидеров показывают хорошее состояние деталей. Механические свойства материалов деталей находятся в пределах ТУ на материал.

Сегодня некоторые основные детали уже вырабатывают свои установленные циклические ресурсы и будут заменяться (например, диски последних ступеней КВД).

Некоторые основные детали в соответствии с Планом управления ресурсами сняты с эксплуата-

ции и подверглись порезке для испытания механических свойств.

Ввиду замены ряда неосновных деталей и необходимости восстановления характеристик двигателя, стоимость ремонтов возросла, однако пока находится в пределах стоимости ремонтов аналогичных зарубежных ГТД (CF6-50, PW-4000, JT9D).

Таблица 2

Время эксплуатации двигателей на крыле без съема

	Двигатель	Наработка без съема, ц
1	JT9D	1250...1600
2	PW4000	1700...3500
3	CF6-50	1250...2500
4	CF6-80	1500...5000

По мнению ряда специалистов, увеличенный объем работ при ремонтах (при визитах в цех) уменьшает вероятность внеплановых съемов.

Стоимости ремонтов зарубежных ГТД с большой степенью двухконтурности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Затраты на ремонт двигателей, (\$ США)

	Двигатель	Материалы	Субконтракты	Трудовые затраты
1	CF6-50	800000	800000	450000
2	PW4000	850000	700000	350000
3	JT9D	800000	700000	385000

Таким образом, как видно из результатов 22-летней эксплуатации двухконтурных двигателей разработки ГП «Ивченко-Прогресс» при установлении ресурсов основным деталям которых был использован ретроспективный метод с применением концепции конструктивного подобию, были достигнуты цели по значительному сокращению затрат (в десятки раз) и уменьшению сроков достижения назначенных ресурсов (на 12 лет) см. рис. 3 [5] и табл. 4.

По прошествии большого времени успешной эксплуатации по техническому состоянию двигателей большой степени двухконтурности разработки ГП «Ивченко-Прогресс», можно с уверенностью сказать (см. выше сравнение с эксплуатацией зарубежных двигателей аналогичного класса тяги), что двигатель и сегодня в достаточной степени востребован. Суммарная наработка парка двигателей с учетом всех его модификаций составляет 2,5 млн. часов. Показатели надежности удовлетворяют требованиям эксплуатантов.

При этом детали двигателей находятся в удовлетворительном состоянии. Механические харак-

теристики и основные данные двигателей свидетельствуют о возможности продолжения эксплуатации в широких пределах циклического ресурса его основных деталей.

Таблица 4

Методы установления ресурсов

	Метод установления ресурсов	Затраты (грн) цены 2000 г.	Недостатки
1	ЭЦИ	235 млн.	Большие материальные затраты и длинные сроки установления
2	Расчетный	8,8 млн.	Очень консервативный и затратный метод
3	Ретроспективный	0,6 млн.	Требует квалифицированного персонала и опыт эксплуатации прототипа

Введение в конструкцию двигателя модифицированных деталей повысит показатели надежности, в том числе период пребывания двигателя на крыле самолета и улучшит характеристики его экономической эффективности.

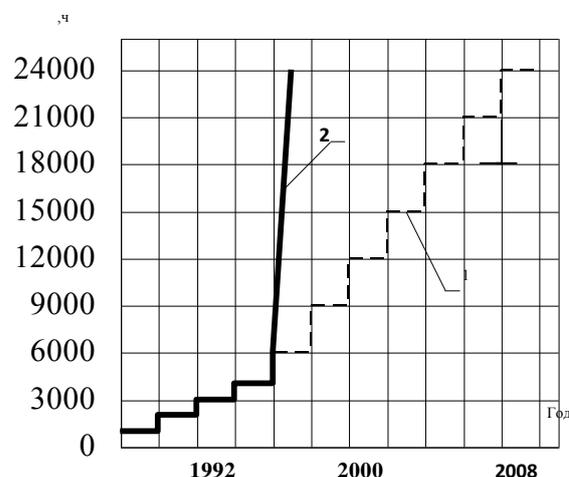


Рис. 3. Увеличение назначенного ресурса основных деталей двигателя с высокой степенью двухконтурности: 1 – на основании метода ЭЦИ, 2 – на основании ретроспективного метода

## Выводы

1. Успешная эксплуатация двигателей большой степени двухконтурности в пределах установленных циклических ресурсов их основных деталей

с использованием ретроспективного метода подтверждает достоверность метода и его преимущества перед другими методами установления ресурсов.

2. Показатели надежности парка эксплуатируемых двигателей удовлетворяют требованиям эксплуатантов.

3. Поддержание требуемого уровня показателей надежности обеспечивается эксплуатацией по техническому состоянию с проведением регулярных инспекций технического состояния и контролем уровня механических свойств деталей.

4. Период пребывания двигателей на крыле самолета соответствует аналогичным периодам при эксплуатации зарубежных двигателей.

### Литература

1. *Виртуальная разработка изделий – технология XXI века [Текст]. – М. : The MSC Software Corporation, 2004. – 84 с.*

2. *Ресурсное проектирование авиационных ГТД [Текст] / Б. Ф. Балашов, И. А. Биргер, Н. Г. Бычков и др. ; под ред. И. А. Биргера. – М. : ЦИАМ, 1990. – № 1253. – 208 с.*

3. *Шереметьев, А. В. Конструктивное подобие в деталях авиационных ГТД [Текст] / А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 9 (96). – С. 49-53.*

4. *Шереметьев, А. В. Анализ опыта эксплуатации зарубежных ГТД по техническому состоянию [Текст] / А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 5(40). – С. 5-8.*

### References

1. *Virtualnaya razrabotka izdeliy tehnologii XXI veka [The virtual working out of articles – the technology of the XXI century]. Moscow, The MSC Software Corporation, 2004. 84 p.*

2. Balashov, B. F., Birger, I. A., Bychkov, N. G. *Resursnoe proektirovanie aviacionnyh GTD [Projection of the aviation GTE service life]. Moscow, CIAM Publ., 1990, no. 1253. 208 p.*

3. Sheremetyev, A. V. *Konstruktivnoe podobie v detalyach aviacionnyh GTD [The design similarity in the aviation GTE elements]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology, 2012, no. 9 (96), pp. 49-53.*

4. Sheremetyev, A. V. *Analiz opyta ekspluatacii zarubezhnyh GTD po trchnicheskomu sostoyaniu [The analysis of the experience of the foreign GTE exploitation on condition]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology, 2003, no. 5 (40), pp. 5-8.*

*Поступила в редакцию 12.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО МЕТОДУ ВСТАНОВЛЕННЯ РЕСУРСІВ АВІАЦІЙНИХ ГТД

*О. В. Шереметьев*

Наведено експериментальне підтвердження правомірності застосування ретроспективного методу встановлення ресурсів головних деталей авіаційних ГТД. Дані двадцяти двохрічної експлуатації ГТД з великим ступенем двохконтурності і порівняння одержаних результатів з результатами експлуатації іноземних двигунів такого ж класу демонструють добре співпадіння. Це свідчить про достовірність розробленого ретроспективного методу встановлення ресурсів у ДП «Івченко-Прогрес» та доцільність подальшого застосування цього методу. В теперішній час перед інженерами авіаційних компаній постанала мета: «...мета полягає в тому, щоб зробити за один рік ту ж саму роботу по створенню авіаційних двигунів, яка робилась раніше за п'ять років та витратити 1 млрд. доларів за роботу, за яку в минулому витрачали 6 або 7 млрд. доларів». Для досягнення такої мети ми повинні змінити методологію створення авіаційних ГТД. Для зменшення часу і витрат на створення, доводку і сертифікацію необхідно створити новий метод забезпечення міцності надійності, який досягає високого рівня достовірності результатів разом з сприймаємими витратами часу та грошей. Покращення методів забезпечення міцності надійності на основі аналізу міцності та експериментально-дослідних робіт, які були зроблені раніше, досвіду доводки та експлуатації конструктивно-подібних деталей двигуна-прототипа роблять вірогідними зменшення часу та витрат на створення, доводку і сертифікацію нових авіаційних ГТД. Випробування концепції конструктивної подібності разом з досвідом створення, доводки та сертифікації авіаційних ГТД за наявності сучасної могутньої обчислювальної техніки та програмного забезпечення для визначення термомеханічного пружно-деформованого стану деталей роблять вірогідним успішне рішення завдання забезпечення міцності надійності деталей в умовах комплексного багатofакторного навантаження. В цьому випадку вірогідне досягнення значної економії витрат і часу, включаючи також і період встановлення ресурсів. Успішна експлуатація двигунів з високим ступенем двохконтурності в межах встановленого ресурсу основних деталей з використанням ретроспективного методу підтверджують його достовірність й переваги перед іншими методами встановлення ресурсів.

**Ключові слова:** ретроспективний метод; великий ступінь двохконтурності; іноземні двигуни; достовірність; ресурс; експлуатація авіаційних ГТД механізми руйнування деталей.

## EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE RETROSPECTIVE METHOD OF THE ESTABLISHING OF THE GTE SERVICE LIFE

*O. V. Sheremetyev*

There was done experimental confirmation of competent using the retrospective method of GTE service life establish. The data of the twenty-two years of the exploitation of the GTE with the high stage of the two contours and comparison of the obtained results with the exploitation of the foreign engines in the same class shows the good agreement. It testifies reliable retrospective method establishing the service life which was developed in the SE “Ivchenko-Progress” and expediency of using this method in the future. At present there is the goal before the engineers of the aviation companies: “...the goal is to make in a year the same work for the creation of aero-engines which was done earlier in five years and expense 1 billion dollars for the work where we expensed in the past 6 or 7 billion dollars”. To achieve such goals we must change the methodology of the creation of the GTE. For the reducing the time and expenses in creation, working out and certification it is necessary to create new methods for providing strength reliability to achieve a high level of the reliable of the results with the combination of acceptable expenses of time and money. The improvement of the methods of providing strength reliability on the base of strength analysis and experimental research works which were done earlier, experience of working out and service of the constructive – similarity parts of the engine – prototypes make it possible to minimize the time and expenditures at the developing, working out and certification of the new aviation GTE. The using of the constructive – similarity conception with the combination of the experience of the creation, working out and certification aviation GTE at the availability of the contemporary powerful calculation technique and software for the determine thermo-mechanical stress-straining condition of the parts makes it possible to successfully solving the task of providing strength reliability parts in the condition of the complex poly factory loading. In this case, it may achieve an essential saving of the expenditures and time, including also the period of the establishing of the service life. The success service of the engines with the high stage of two contours at the limits of the establishing cycle life of the main parts with the using the retrospective method confirms its authenticity and advantages with others methods of service life establish.

**Keywords:** retrospective method; high stage of two contours; foreign engines; reliability; service life; exploitation of the aviation GTE; mechanism of the parts destroy.

**Шереметьев Александр Викторович** – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Sheremetyev Olexandr Victorovich** – Candidate of Science, Deputy Chief Designer of SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: 03530@ivchenko-prgress.com. ORCID Author ID: 0000-0001-9899-6739.