

## МЕТОД ПОДСЧЕТА РЕСУРСОВ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД В ЭКСПЛУАТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Мусеев А.А., Самсонов Д.С.  
АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург,  
[museev\\_aa@klimov.ru](mailto:museev_aa@klimov.ru), [ds\\_samsonov@klimov.ru](mailto:ds_samsonov@klimov.ru)

*Ключевые слова:* основные детали ГТД, ресурс, циклическая долговечность.

В статье представлены основные положения метода подсчета ресурсов основных деталей ГТД в эксплуатации. В основе метода лежит применение аппроксимирующей функции, позволяющей в рамках принятых допущений вычислять повреждаемость детали за один полет на основе данных, полученных из средств объективного контроля. Вид аппроксимирующей функции выбран исходя из стандартной зависимости кривой малоцикловой усталости для «мягкого» цикла нагружения. При этом степенные коэффициенты аппроксимации должны быть вычислены с использованием результатов расчета циклической повреждаемости деталей за полет в реальных условиях эксплуатации.

Контроль ресурса основных деталей газотурбинных двигателей (далее – ГТД) для летательных аппаратов маневренной авиации и вертолетной техники представляет собой весьма актуальную проблему, поскольку, как показывает практика, циклические нагрузки в условиях реальных полетных заданий могут значительно отличаться от типовых полетных циклов (далее – ТПЦ), которые используются при разработке изделий и установлении их ресурсных показателей. Реальные профили полетов могут быть как слабонагруженными, так и сильно нагруженными относительно осредненного проектного вида ТПЦ. Учет данных отклонений позволяет наиболее рациональным образом управлять послепродажным обслуживанием изделия, обеспечивая его надежность и безопасность полетов.

Кроме того, в отраслевой нормативной документации и технических заданиях на разработку ГТД сформулированы вполне конкретные требования к системам учета наработки в эксплуатации, а именно:

- система автоматизированного регулирования и контроля должна иметь функцию подсчета ресурсов в часах и циклах для двигателя и в циклах для его основных деталей;
- подсчет ресурсных показателей должен выполняться в режиме реального времени;
- алгоритмы контроля должны обеспечивать пересчет измеряемых параметров в параметры нагружения основных деталей в критических точках.

В настоящей статье рассматривается проблема вычисления расходования ресурсов основных деталей в циклах.

На основе статистики и анализа полетов в АО «ОДК-Климов» разработана и согласована с НИИ промышленности методика учета расходования ресурса основных деталей двигателей в эксплуатации, алгоритмы методики внедрены в БАРК серийных изделий (Первая редакция методики учета расходования ресурсов была разработана заместителем генерального конструктора, Карасевым Олегом Валерьяновичем, и реализована в счетчике наработки и контроля СНК-78-1 для двигателей ТВ3-117 в 1999 г., в дальнейшем с учетом опыта эксплуатации и набором экспериментальных данных методика претерпела некоторые уточнения).

Условие израсходования ресурса детали выполняется в случае, когда суммарное накопленное значение циклической повреждаемости детали за все время работы достигает величины защищенной повреждаемости этой детали, установленной по результатам ресурсных испытаний (1).

$$\sum \Pi = [\Pi] \quad (1)$$

Суммирование циклической повреждаемости выполняется по основному и дополнительным подциклам, которые выделяются методом «дождя» по параметру частоты вращения роторов. При этом на основе анализа повреждаемости наборов подциклов с

различными размахами частот вращения фиксируется критерий фильтрации значимых и не значимых подциклов; не значимые подциклы в суммировании не участвуют.

Для унификации вводятся параметры относительной повреждаемости детали, приведенные к повреждаемости основного подцикла вида «0-Макс-0», где режим «Макс» характеризуется максимальной частотой вращения 100% и температурным градиентом, вызывающим наибольшие напряжения в детали.

Повреждаемость основного подцикла определяется через повреждаемость подцикла вида «0-Макс-0» на основе классической эмпирической зависимости, связывающей логарифм числа циклов до разрушения с напряжениями, которые принимаются пропорциональными квадрату частоты вращения ротора. Повреждаемость дополнительных подциклов определяется по аппроксимационным зависимостям, учитывающим частоты вращения переходных режимов. В результате, для вычисления относительных повреждаемостей сформированы аппроксимационные зависимости, представляющие собой степенные функции от частоты вращения, коэффициенты степени которых должны быть определены на основе прямых вычислений повреждаемостей по малоцикловой усталости (далее – МЦУ) деталей на валидированных моделях высокого уровня. Точность вычислений напрямую зависит от полноты валидационного базиса и банка конструкционной прочности применяемых материалов.

Поскольку прямые вычисления повреждаемостей деталей представляют собой сложную мультифизичную задачу, включающую в себя термодинамические расчеты параметров режимов работы двигателя, гидравлические расчеты, нестационарные тепловые расчеты, расчеты напряженно-деформированного состояния и долговечности по МЦУ для различных наборов типовых полетных циклов, а также отдельных подциклов и циклограмм реальных полетов (требуется для оценки точности и консервативности метода), для организации процессов расчета целесообразным является использование автоматизированных расчетных цепочек с соответствующей поддерживающей инфраструктурой (в корпоративной терминологии – комплексные компьютерные модели, цифровой двойник). Применение технологии цифровых двойников не является основным требованием для реализации счетчика ресурса, однако данная технология представляет собой удобный и оптимальный инструмент для исследования чувствительности методики к различным параметрам влияния, например, интервалам допусков на размеры деталей, деградации свойств материалов, изменению параметров работы двигателя в процессе его эксплуатации.

Описанный метод прошел апробацию на двигателях семейства РД-33 и ВК-2500, принцип оценки выработки ресурса основных деталей признан правильным и допущен к применению.

### **Список литературы**

1. Шимановская Н.А., Симбирский Д.Ф., Гликсон И.Л., Шанькин С.И. Упрощенный метод мониторинга выработки ресурса авиационных ГТД / Сборник «Авиационно-космическая техника и технология», 2011, №10 (87), с. 119-122.
2. Федорченко Д.Г. Разработка методов и систем контроля исчерпания ресурса ГТД в эксплуатации / Вестник УГАТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника, 2015, №1 (67), с. 55-61.
3. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – ОАО Авиадвигатель. Пермь, 2006. 398 с.

### **Сведения об авторах**

Мусеев А.А., заместитель начальника ОКБ по расчетам АО «ОДК-Климов». Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности конструкций, расчеты трещиностойкости, ресурсные испытания ГТД и его основных деталей.

Самсонов Д.С., и.о. ведущего инженера-конструктора – руководителя бригады ресурсов двигателей АО «ОДК-Климов». Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты НДС и долговечности роторных деталей двигателя, расчеты трещиностойкости.

## **THE METHOD FOR CALCULATING DURABILITY OF ENGINE MAIN PARTS IN EXPLOITATION WITH DIGITAL TWIN TECHNOLOGY USAGE**

Museev A.A., Samsonov D.S.  
JSC «UEC-Klimov», Saint Petersburg,  
[museev\\_aa@klimov.ru](mailto:museev_aa@klimov.ru), [ds\\_samsonov@klimov.ru](mailto:ds_samsonov@klimov.ru)

*Keywords: main parts of GTE, durability, low cycle fatigue.*

The article presents the main provisions of the method for calculating durability of GTE main parts. The method is based on the application of an approximating function that allows, within the accepted assumptions, to calculate the damage of a part per flight based on data obtained from objective control means. The type of approximating function is chosen based on the standard dependence of the low-cycle fatigue curve for a «soft loading» cycle. The power-law approximation coefficients should be calculate using the results of calculation the cyclic damage of parts per flight in real exploitation conditions.

### Information about the authors

Museev A.A., deputy head EDB for calculations JSC «UEC-Klimov». Area of research interests: GTE development, calculations of durability of structures, crack resistance calculations, durability tests of GTE and its main parts.

Samsonov D.S., acting lead design engineer – head of the engines durability team JSC «UEC-Klimov». Area of research interests: GTE development, calculations of SSS and durability of rotor engine parts, crack resistance calculations.