

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ И РЕСУРСА ГТД В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Мусеев А.А., Зильберберг В.Л., Самсонов Д.С.

АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург,

museev_aa@klimov.ru, vzilberberg@klimov.ru, DSamsonov@klimov.ru

Ключевые слова: автоматизированная расчётная цепочка, газотурбинный двигатель (ГТД), управление требованиями, цифровой двойник

Представлен комплексный обзор подходов АО «ОДК-Климов» к управлению разработкой и обеспечению ресурса авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Особое внимание уделено вопросам обеспечения прочности конструкций: рассмотрены эволюция методик расчёта циклической долговечности, принципы построения цифровых двойников изделий, архитектура автоматизированных расчётных цепочек (АРЦ) и специализированная система управления требованиями. Продемонстрирована эффективность интеграции указанных технологий в единый цифровой контур проектирования, позволяющий гарантировать прочностную надёжность изделия на всех этапах жизненного цикла.

Современные ГТД характеризуются высокой конструктивной сложностью, мультидисциплинарностью расчётов и жёсткими нормативными требованиями к статической прочности, малоцикловой усталости и несущей способности. В условиях сжатых сроков опытно-конструкторских работ традиционные итерационные методы проектирования и экспериментального подтверждения работоспособности конструкций теряют эффективность. Цифровая трансформация инженерных процессов, включающая внедрение цифровых двойников, автоматизацию прочностных и ресурсных расчётов, а также системное управление требованиями, позволяет существенно повысить качество, скорость и обоснованность принимаемых проектных решений.

В рамках статьи выделено несколько ключевых подходов, получивших значительное развитие в АО «ОДК-Климов» и направленных на обеспечение прочностной надёжности ГТД:

1. Поэтапное развитие методик расчёта циклической долговечности;
2. Построение автоматизированных расчётных цепочек (АРЦ) в контуре разработки цифровых двойников;
3. Разработка специализированной системы управления требованиями;
4. Разработка собственных программных комплексов для автоматизации расчётов.

Оценка ресурса деталей ГТД, подверженных повреждению по малоцикловой усталости (МЦУ), в АО «ОДК-Климов» прошла пять принципиальных этапов трансформации, обусловленных ростом вычислительных мощностей и ужесточением нормативных требований.

На первом этапе расчёт напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнялся по аналитическим уравнениям с последующей коррекцией на концентрацию напряжений по справочнику Р. Петерсона. Переход к упругопластическим деформациям осуществлялся применением гиперболы Нейбера, а оценка числа циклов до разрушения проводилась по модифицированному уравнению Мэнсона–Коффина с нормативным запасом $K=5$.

Второй этап предполагал использование экспериментальных кривых МЦУ «мягкого» цикла ($\Delta\sigma-N$), однако отраслевые рекомендации ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» в пользу кривых «жёсткого» цикла ($\Delta\varepsilon-N$) и высокая трудоёмкость формирования банка данных материалов ограничили его применение.

С появлением третьего этапа (МКЭ-ориентированного) НДС стало определяться с учётом реальной геометрии и концентрации напряжений методом конечных элементов, при этом постобработка по Нейберу и Мэнсону–Коффину сохранялась в ручном/полуавтоматическом режиме.

Четвёртый этап характеризуется переходом к трёхмерно-нелинейным расчётам с использованием кривых деформирования материалов и макросов ANSYS APDL. Это позволило значительно повысить точность прогнозирования повреждаемости за счёт прямого моделирования нелинейного поведения материала в зонах концентрации напряжений.

На современном, пятом этапе, разработано специализированное АСТ-приложение, обеспечивающее полностью автоматизированную оценку циклической долговечности всей детали. Программа исключает ручные операции постобработки, минимизирует влияние человеческого фактора и позволяет оперативно проводить параметрические исследования при изменении режимов работы двигателя или геометрии детали.

Для решения мультидисциплинарных задач обоснования ресурсных показателей ДСЕ в проекте вертолётного двигателя ВК-650В реализованы автоматизированные расчётные цепочки (АРЦ). АРЦ представляют собой совокупность взаимосвязанных математических моделей, обеспечивающих сквозной расчёт НДС и накопленной повреждаемости в типовом полётном цикле ЛА.

Интеграция выполнена на отечественной платформе pSeven Enterprise (DTSeven), обеспечивающей «бесшовную» передачу граничных условий и полей параметров между этапами расчетов без участия инженера-расчётчика. Входными данными являются параметры полётного цикла (режимы, длительность, высота, скорость, температура на входе), выходными – значения повреждаемости в узлах КЭ-модели с расчётом как по модифицированному уравнению Мэнсона–Коффина, так и по кривым МЦУ «жёсткого» цикла.

Верификация АРЦ проводилась путём сравнения с результатами пошагового ручного расчёта и данных натурных испытаний. Внедрение АРЦ ускорило расчёт одного полётного цикла более чем в 2 раза, а при пакетной обработке множества циклов и эксплуатационных условий – более чем на порядок. АРЦ стали вычислительным ядром цифрового двойника (ЦДИ), сформировав основу для вариантов ЦДИ «как спроектировано», «как изготовлено» и «как испытано».

На текущий момент ведётся разработка АРЦ и для других изделий АО «ОДК-Климов», таких как ТВ7-117 и ВК-1600, где количество основных деталей значительно выше в силу схемных решений двигателей.

Эффективное функционирование цифрового двойника и АРЦ невозможно без строгой системы учёта и верификации проектных ограничений. Для решения этой задачи специалистами АО «ОДК-Климов» разработана система управления требованиями RakeRMS (свидетельство о регистрации № RU2024668483), соответствующая требованиям ГОСТ Р 59194-2020 [1].

Система обеспечивает:

- создание и версионирование многоуровневых матриц требований (от уровня двигателя до уровня детали);
- формирование карточек требований с указанием метода определения соответствия (МОС), целевых значений, условий и ссылок на расчётные модели;
- ролевую модель доступа, аудит изменений и историю получения целевых показателей;
- цветовую индикацию статуса выполнения требований (зелёный – выполнено, красный – не выполнено, жёлтый – не определено/ошибка);
- автоматическую выгрузку расчётных значений из pSeven Enterprise в матрицу требований без ручного ввода;
- генерацию табличных отчётов для руководящего состава и сертификационных органов.

Ключевая особенность системы управления требованиями – обеспечение сквозной прослеживаемости: каждый критерий «зачётности» привязан к конкретной ветви АРЦ или расчётной модели. Система успешно апробирована в контуре ЦДИ ВК-650В для подтверждения ресурсных показателей основных деталей, оценки достаточности охлаждения и проверки требований по газодинамической устойчивости. RakeRMS выступает связующим звеном между техническим заданием, расчётными прогнозами и нормативной документацией, формируя объективную базу для принятия решений главным конструктором.

Параллельно с развитием расчетных методик в АО «ОДК-Климов» разработаны специализированные программные комплексы для оценки прочности рабочих колес турбины и компрессора, основанные на аналитических методиках имеющегося программного обеспечения, написанного на языке Fortran.

Список литературы

1. ГОСТ Р 59194–2020. Управление требованиями. Основные положения; <https://internet-law.ru/gosts/gost/75310/>

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.

Зильберберг В.Л. – ведущий инженер-конструктор, руководитель бригады систем инженерного анализа. Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности роторных деталей двигателя, расчеты трещиностойкости.

Самсонов Д.С. – ведущий инженер-конструктор, руководитель бригады ресурса двигателей. Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности деталей, расчеты трещиностойкости.

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO ENSURING THE STRENGTH RELIABILITY AND RESOURCE OF GAS TURBINE ENGINES IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION

Museev A.A., Zilberberg V.L., Samsonov D.S.

JSC «UEC-Klimov», Saint Petersburg,

museev_aa@klimov.ru, vzilberberg@klimov.ru, DSamsonov@klimov.ru

Keywords: automated calculation chain, gas turbine engine (GTE), requirements management, digital twin

This article presents a comprehensive overview of JSC UEC-Klimov's approaches to managing the development and service life of aircraft gas turbine engines (GTEs). Particular attention is paid to ensuring structural strength: the evolution of cyclic life calculation methods, the principles of constructing digital twins of products, the architecture of automated calculation chains (ACCs), and a specialized requirements management system are discussed. The effectiveness of integrating these technologies into a unified digital design framework is demonstrated, ensuring the strength and reliability of the product at all stages of the life cycle.