

УДК 532.5+621.45/6.07

Методика газодинамического анализа комбинированной системы щеточного и лабиринтного уплотнений в перспективных авиационных двигателях

Загородников Сергей Анатольевич^(*)

zagorodnikovsergey@yandex.ru

Силуянова Марина Владимировна

dc2mati@yandex.ru

Московский авиационный институт, Москва, Россия

Аннотация. Разработана методика газодинамического анализа комбинированной системы уплотнений авиационных газотурбинных двигателей, состоящей из щеточного уплотнения, буферной полости под камерой сгорания и лабиринтного уплотнения. Методика предусматривает последовательный переход от двумерной осесимметричной постановки задачи к трехмерному моделированию в среде Ansys CFX. Особое внимание уделено корректному учету связи между элементами системы и граничным условиям, моделирующим выход потока из щетки в буферную полость и последующее дросселирование в лабиринтном уплотнении. Проведена верификация методики на основе полуэмпирических моделей и экспериментальных данных. Показано, что применение предложенного подхода позволяет с точностью до 9 % прогнозировать расходные характеристики всей системы, что способствует оптимизации рабочих процессов компрессора и повышению эффективности двигателя.

Ключевые слова: щеточное уплотнение, лабиринтное уплотнение, газодинамический анализ, комбинированная система уплотнений, вычислительная гидродинамика (CFD), авиационный двигатель, область под камерой сгорания

Введение. Современные тенденции в авиадвигателестроении требуют значительного повышения топливной эффективности, где ключевую роль играет минимизация утечек рабочего тела через зазоры. Эффективным решением является применение комбинированных систем, где щеточные уплотнения, обладающие высокой герметичностью на установившихся режимах, работают совместно с надежными лабиринтными уплотнениями. Проектирование таких систем сопряжено со сложностью прогнозирования газодинамических характеристик, особенно в условиях, когда выход потока из щетки ведет в буферную полость под камеру сгорания, а затем в лабиринтное уплотнение. Существующие упрощенные модели не учитывают взаимовлияние элементов этой системы, что обуславливает необходимость разработки более точных и надежных методов анализа [1].

Методы и материалы; результаты. Для решения поставленной задачи была разработана комплексная методика, включающая следующие этапы.

Создание и анализ двумерной осесимметричной (2D-axisymmetric) модели комбинированной системы: щеточное уплотнение, буферная полость под камерой сгорания, лабиринтное уплотнение [2].

Разработка трехмерной параметрической модели системы с учетом реальной геометрии. Лабиринтное уплотнение моделировалось как многоступен-

чатое с учетом геометрических параметров: радиальный зазор, шаг, высота и количество гребней [2, 3].

Формирование гибридной расчетной сетки с уплотнением в призазорной области и в буферной полости.

Математическое моделирование течения газа с использованием ансамбля осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS) и замыкающих моделей турбулентности (SST $k-\omega$). Слой щетки моделировался как пористая среда. Для расчета утечек через лабиринтное уплотнение применялась модель, учитывающая коэффициент расхода [4].

Верификация методики проводилась путем сравнения расчетных значений расхода утечки с экспериментальными данными [5].

В результате исследований установлено, что учет взаимного влияния элементов комбинированной системы позволяет значительно точнее определять ее расходные характеристики. Показано, что гидродинамическая структура потока на выходе из щетки и в буферной полости существенно влияет на эффективность последующего лабиринтного уплотнения. Проведенный верификационный анализ показал хорошую сходимость расчетных данных: среднее отклонение не превысило 9–13 % от показателей прототипа, что свидетельствует об адекватности предложенной физической и математической моделей.

Заключение. Разработанная методика газодинамического анализа комбинированной системы уплотнений, предусматривающая последовательный переход от 2D- к 3D-постановке, позволяет с достаточной для инженерной практики точностью оценивать расходные характеристики на ранних стадиях проектирования. Ее применение позволяет оптимизировать геометрию и параметры каждого элемента системы для минимизации перетечек, что ведет к повышению КПД компрессора и снижению удельного расхода топлива перспективных авиационных ГТД.

Список источников

- [1] Загородников С.А. Сравнение пористого и щеточного уплотнений в расчетной области под камерой сгорания в газотурбинном двигателе SaM-146 с помощью инструмента анализа Ansys CFX. *Гагаринские чтения. 50-я Междунар. молодеж. науч. конф.: сб. докл.* Москва, Перо, 2024, с. 72–73.
- [2] Загородников С.А., Самойлов А.В., Силуянова М.В. Разработка математической модели воздушного потока в области под камерой сгорания перспективного авиационного ТРДД классом тяги 70 кН. *III Науч.-практ. конф. аспирантов: сб. тез.* Жуковский, Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2024, с. 25–28.
- [3] Загородников С.А., Силуянова М.В. *Программное обеспечение для автоматизированного расчета и проектирования лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей с открытой накопительной базой (Genesis 1.3)*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665053 РФ, 2025.

-
- [4] Силуянова М.В. Исследование тепловых характеристик турбореактивных двигателей методом математического моделирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 1, с. 57–68.
 - [5] Соколов П.Н., Орлов Л.Д. Моделирование тепловых процессов в турбореактивном двигателе с использованием метода конечных элементов. *Авиакосмическая техника и технология*, 2019, вып. 11, с. 42–49.