

УДК 621.452.3

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЕГО ЛОПАТОК

Горячкин Е.С., Кудряшов И.А., Сулейманов А.Р.

e-mail: gdi@ssau.ru

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, г. Самара, Российская Федерация*

При разработке конструкции лопатки компрессора необходимо удовлетворить множеству разнообразных требований, которые предъявляются к газодинамическим, прочностным и массовым характеристикам проектируемого изделия [1]. При этом также необходимо учесть технологические и конструктивные ограничения.

Разнообразие этих требований приводит к такой проблеме, что при модификации конструкции лопатки рабочего колеса с целью улучшения одних её характеристик, другие ухудшаются [2]. В данной работе для решения описанной проблемы разработана единая автоматизированная параметризованная многодисциплинарная модель лопатки компрессора, содержащая аэродинамическую и прочностную подмодели.

Разработанная модель позволяет исследовать различные схемы параметризации лопатки для получения оптимальной с точки зрения аэродинамики и прочности конструкции. В ходе работы согласно выбранным критериям и ограничениям выбираются несколько оптимальных схем параметризации.

В качестве объекта оптимизации выбран экспериментальный компрессор NASA Rotor 37 [3]. Данный компрессор имеет степень повышения давления 2,05 и КПД 0,84 при расходе рабочего тела 20,74 кг/с.

Расчёт газодинамических параметров работы ступени NASA Rotor 37 выполнялся с использованием CFD пакета Numeca Fine/Turbo [4].

Геометрия лопаток компрессора ротора и статора была воссоздана на основе информации, полученной из отчета NASA [3].

Для выполнения сеточного исследования был создан набор расчётных сеток, различающихся количеством и распределением слоев сети по высоте проточной части ступени, а также набор расчётных сеток различающихся количеством элементов в одном слое сети.

Распределение слоев элементов в расчётной сети характеризовалось параметрами:

ER – фактор роста ячеек, показывает во сколько раз высота одного слоя КЭ больше следующего;

MR – максимальная относительная высота ячеек канала, определяется максимальным отношением высоты элемента в канале к высоте первой пристеночной ячейки.

В процессе сеточных исследований значение ER варьировалось от 1,2 до 1,8; значение MR варьировалось от 500 до 2000. Количество элементов в одном слое сетки варьировалось от 1,04 млн. до 3,13 млн.

В качестве граничных условий на входе в ступень задавалось значение полного давления $p^*=101,325$ кПа и полной температуры $T^*=288,15$ К. Направление потока на входе в расчетную область было задано осевым. На выходе задавалось значение

статического давления. Значение параметра y^+ во всех созданных моделях было обеспечено равным 1. Использовалась модель турбулентности $k-\varepsilon$ (Low Re Yang-Shih).

Анализируя рассчитанные параметры работы компрессора с использованием разных сеток и экспериментальные данные, было определено, что наилучшая сеть для выполнения оптимизации с параметрами $ER = 1.2$, $MR = 500$ и количеством элементов в одном слое сети 1,84 млн.

С использованием программного комплекса Numeca AutoBlade были созданы параметрические модели лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата компрессора.

Двухмерное перепрофилирование каждой из лопаток выполнялось в трёх сечениях: втулочном, среднем и периферийном. В каждом сечении лопатки ротора и статора менялась форма средней линии, заданной в виде квадратичного сплайна Безье. Форма сплайна определялась расположением полюсов сплайна, координаты которых рассчитывались *NumecaAutoBlade* автоматически на основе значений: угла установки γ ; величины хорды лопатки *Chord*; входного лопаточного угла β_1 ; выходного лопаточного угла. Также в каждом сечении рабочей лопатки менялась форма спинки и корытца. Форма спинки и корытца определялась сплайном Безье, построенным по нескольким полюсам. Количество полюсов на спинке и корытце менялось в зависимости от схемы параметризации. Всего было рассмотрено четыре схемы параметризации с количеством полюсов от 5 до 11.

Для каждой схемы параметризации ступени NASARotor 37 задача оптимизации решалась в следующей постановке.

Критерии оптимизации: максимизация КПД ступени; минимизация центробежной нагрузки от лопатки на диск $F_{цб}$.

В качестве ограничений задавались: расход рабочего тела через ступень не более $\pm 0.5\%$ от базового значения; степень повышения полного давления в ступени не более $\pm 0.5\%$ от базового значения; угол выхода потока из ступени не более $\pm 2,5$ градуса от базового значения; максимальное значение напряжений в лопатке не выше 400 МПа; обеспечение отстройки первых 5-ти собственных частот от опасных резонансов.

Во всех постановках задачи оптимизации удалось получить повышение КПД ступени при выдерживании прочностных ограничений. При этом результаты, полученные в результате решения задачи с 11 полюсами практически идентичны результатам решения задачи с 7 полюсами, что свидетельствует о том, что повышение количества переменных, описывающих спинку и корытце, больше, чем задано в задаче с 7 полюсами, нецелесообразно. Максимальное повышение КПД составило 1,2 % по сравнению с базовым вариантом.

Библиографический список

1. Кулагин, В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В.В. Кулагин. – М.: Машиностроение, 2003. – 618 с.
2. Н. Кампсти, Аэродинамика осевых компрессоров, М, Мир, 2000 год, – 688с.
3. Lonnic Reid, Royce D. Moore. Design and Overall Performance of Four Highly Loaded, High-Speed Inlet Stages for an Advanced High-Pressure-Ratio Core Compressor. NASA Technical Report 1337, 1978
4. FINE/Turbo v9.0 Flow Integrated Environment. User Manual. NUMECA International, Belgium, 2013