

ПОВЫШЕНИЕ КПД КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ЗА СЧЁТ ОПТИМИЗАЦИИ УГЛОВ УСТАНОВКИ СТАТОРНЫХ ЛОПАТОК

© 2012 Г. М. Попов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассмотрена оптимизация многоступенчатого компрессора ГТД. Оптимизация была проведена за счёт изменения углов установки лопаток направляющих аппаратов трёх ступеней. В результате проведённой оптимизации достигнуто повышение КПД компрессора на 0,3% на одном из основных режимов работы.

Оптимизация, характеристики компрессора, параметрическая модель.

Доводка компрессоров газотурбинных двигателей является сложной научно-технической задачей [1]. В процессе её решения конструктору необходимо учитывать противоречивые требования газодинамической эффективности, надёжности и ресурса. Как правило, данный процесс носит итеративный характер: осуществляется доводка конкретного элемента базовой конструкции и оценивается, как данное изменение повлияет на эффективность узла двигателя в целом. Однако в реальных условиях из-за сложности рабочих процессов в компрессорах ГТД отслеживать такие изменения оказывается далеко не просто.

Стремительное развитие численных методов существенно ускорило процесс разработки и доводки узлов ГТД. Современные программы CFD-моделирования, такие как NUMECA и ANSYS CFX, позволяют проводить численный эксперимент по исследованию течения рабочего тела в лопаточных машинах. При этом течение газа описывается с минимальными допущениями при помощи уравнений Навье-Стокса. Благодаря развитию вычислительной техники данные расчёты занимают сравнительно небольшое время, что делает возможным применение

методов оптимизации при доводке компрессоров ГТД. Современные методы и программы оптимизации, такие как IOSO, позволяют при решении задачи варьировать сотней переменных для достижения высоких показателей эффективности узлов и надёжности ГТД в целом.

В статье приведён опыт применения программного комплекса IOSO при оптимизации 7-ступенчатого компрессора ГТД. Целью оптимизации было повышение КПД компрессора на крейсерском режиме за счёт оптимизации геометрических параметров направляющих аппаратов первых трёх ступеней.

Решение задачи оптимизации можно разделить на следующие этапы:

- постановка задачи оптимизации;
- создание параметрической геометрической модели исследуемого узла;
- создание расчётной модели;
- запуск задачи оптимизации;
- обработка результатов расчёта.

Постановка задачи оптимизации

В качестве объекта оптимизации был выбран семиступенчатый компрессор высокого давления (КВД) ГТД (рис. 1).

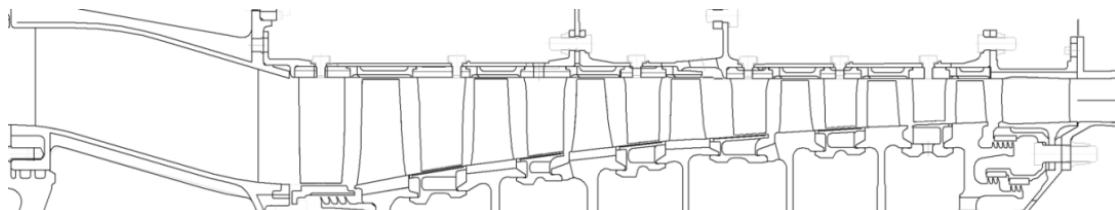


Рис. 1. Исследуемый КВД

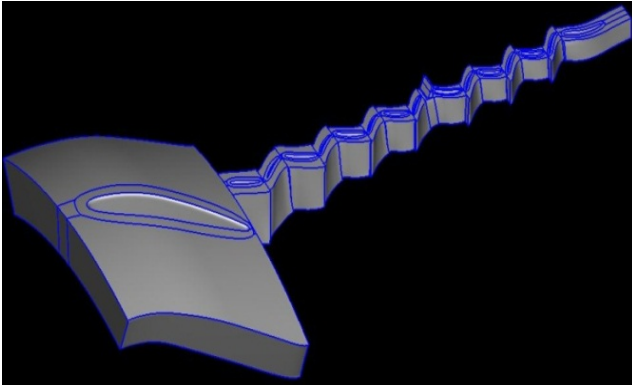


Рис.2. Пространственная геометрия расчётной области КВД

В ходе решения задачи использовался только один критерий оптимизации: КПД компрессора в рабочей точке на крейсерском режиме работы ($\overline{n}_{пр}=1$). Ограничение на положение рабочей точки (по расходу воздуха G и степени повышения давления π_k^*) на характеристике компрессора не накладывалось.

В качестве переменных были приняты углы установки лопаток направляющих аппаратов первой ступени (НА1), второй ступени (НА2) и третьей ступени (НА3). Диапазоны изменения углов установки определялись из условия нахождения втулочного профиля в пределах замка лопатки.

Создание параметрической модели КВД

Параметризация КВД была выполнена с использованием программы «Профилятор» [2], разработанной на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ. Данная программа позволяет создавать на основе текстового файла, содержащего основные параметры профиля лопатки, файлы исходных данных для построения геометрической модели компрессора (рис. 2) и разбиения её сеткой конечных элементов во встроенном сеткопостроителе программы Numesa – AutoGrid. Вся цепочка действий (запуск программ, запись файлов и построение сетки) выполняется связанно, с помощью программы оптимизации IOSO.

Параметрическая модель КВД включает в себя домены, соответствующие ВНА, РК, НА и средней опоре рассматриваемого компрессора. Модель – секторная, включающая по одному межлопаточному каналу каждого лопаточного венца (ЛВ).

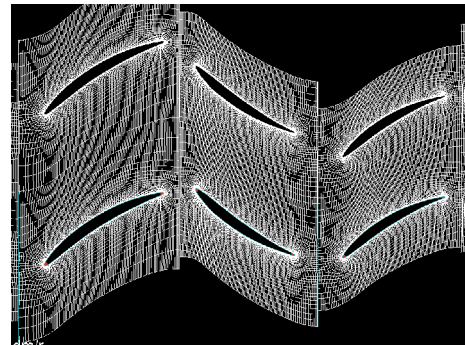


Рис.3. Сетка конечных элементов в межлопаточных каналах НА1, РК2 и НА2

Описание расчётной модели

Для решения задачи оптимизации была создана базовая расчётная модель компрессора.

Сетка расчётной модели КВД содержала 8183960 элементов (рис 3). Среднее количество элементов в каждом ЛВ составляло 495000 элементов. Размер элемента, ближайшего к стенке, в расчётной модели был равен 0,001 мм, что обеспечивало значение безразмерного параметра y^+ на стенках, равное 1.

В качестве рабочего тела использовался идеальный газ со свойствами сухого воздуха. В расчётах учтена зависимость теплоёмкости и динамической вязкости рабочего тела от температуры.

Расчёт всех рабочих венцов проводился во вращающейся системе координат. Скорость вращения соответствовала выбранной частоте вращения ($\overline{n}_{пр}=1$). Расчёт неподвижной проточной части: опоры, входного направляющего аппарата (ВНА) и всех направляющих аппаратов (НА) проводился в стационарной системе координат.

Передача параметров потока между венцами осуществлялась с помощью интерфейса Mixing Plane с осреднением параметров в окружном направлении.

В качестве граничных условий на входе в расчётную область задавался профиль полного давления, осреднённый в окружном направлении, полная температура и направление потока относительно оси КВД. На выходе из КВД задавалась величина статического давления на втулке. В ходе расчётов была использована модель турбулентности $k-\epsilon$ (Low Re Yang-Shih).

Для проверки адекватности созданной модели были получены расчётные характеристики компрессора и проведено их сравнение с экспериментальными данными (рис. 4 и 5). На графиках под $\overline{G}_{пр}$ понимается от-

ношение расхода в расчётной точке к расходу в текущей точке на характеристике. На рис. 6 и 7 показаны характеристики, соотношенные по приведённому относительному расходу.

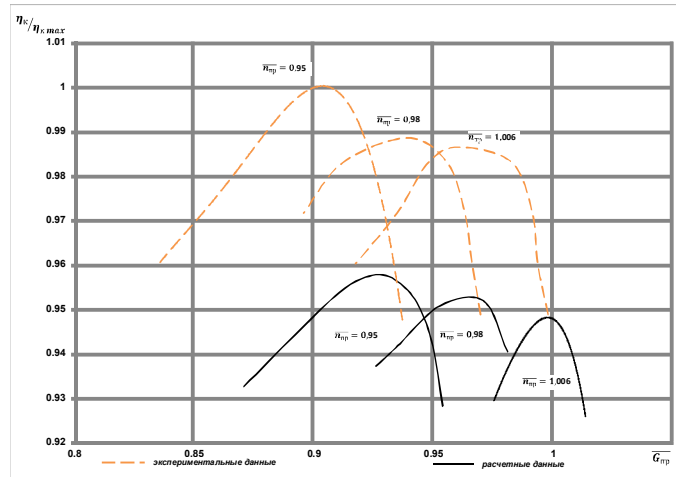


Рис. 4. КПД-характеристики базового варианта КВД

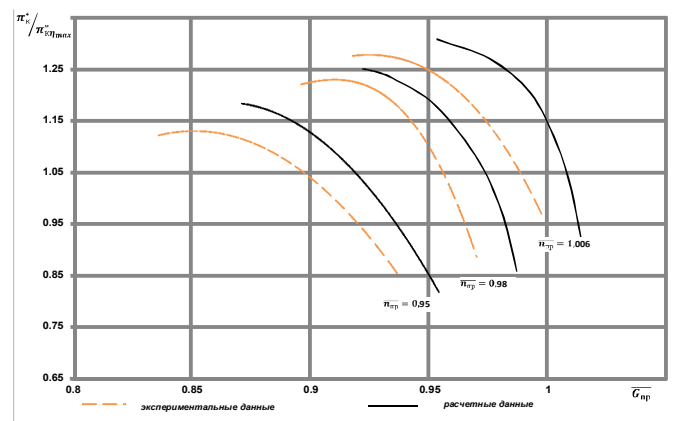


Рис. 5. Напорные характеристики базового варианта КВД

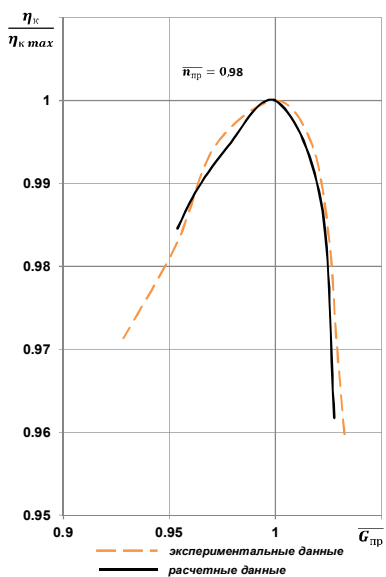


Рис. 6. КПД-характеристики базового варианта КВД, соотносённые по расходу воздуха

Анализ характеристик свидетельствует о высоком качестве построенной расчётной модели КВД: расчётные характеристики качественно согласуются с экспериментальными данными (наблюдается сходный характер протекания КПД и напорных линий). Погрешность по расходу между экспериментальными и расчётными линиями в области записания на напорной характеристике не превышает 3%.

Все изменения, вносимые в созданную расчётную модель в ходе решения задачи оптимизации, касались только указанных выше венцов – НА1, НА2, НА3. Остальные параметры модели, настройки решателя оставались постоянными на всех этапах решения задачи.

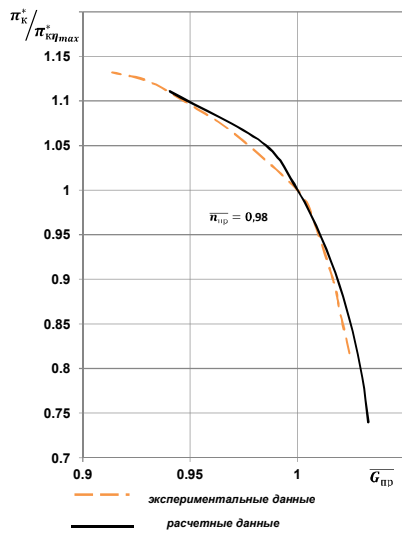


Рис. 7. Напорные характеристики базового варианта КВД, соотнесённые по расходу

Запуск и решение задачи оптимизации

Для решения поставленной задачи был создан автоматизированный интегрированный расчётный комплекс под управлением программы-оптимизатора IOSO (оптимизация). Данная программа, являясь ядром расчётного комплекса, предназначена для запуска остальных программ, открытия рабочих файлов, сохранения изменений в проекте расчета, анализа результатов и непосредственно для самой оптимизации.

Программа «Профилятор» включена в расчётный комплекс для осуществления профилирования корректируемых лопаток с учётом изменяющихся углов установки, а также для получения файлов, позволяющих построить расчётные области вокруг лопаток.

В сеткогенераторе Auto Grid 5 на основе файлов, полученных в программе «Профилятор», создавалась новая и корректировалась уже построенная сетка конечных элементов с учётом изменений, заложенных в исходных файлах.

Программный комплекс Numesa Fine Turbo отвечал за расчёт рабочего процесса в компрессоре по созданной модели.

Последовательно, под управлением программы IOSO, выполнялся следующий алгоритм действий:

- задание в файле программы «Профилятор», описывающего геометрию лопатки, начального значения угла установки профиля каждой корректируемой лопатки;

- создание в программе «Профилятор» для каждой корректируемой лопатки файла с разрешением .geomturbo, необходимого для построения расчётной области домена вокруг изменяемой лопатки;
- запуск в программе Auto Grid 5 проекта сетки базовой расчётной модели; замена базовой геометрии лопаточных венцов НА1, НА2, НА3 на скорректированную; построение сетки конечных элементов, сохранение проекта;
- запуск построенной расчётной модели на решение с настройками, соответствующими базовой модели компрессора.

В результате решения задачи формировался MF-файл, в котором содержались все важнейшие интегральные характеристики рассчитываемого компрессора, включая его КПД. Программа IOSO считывала с заданной позиции в данном файле значение КПД компрессора. Программа оптимизации обрабатывала полученные данные и выдавала следующие значения варьируемых переменных (углов установки лопаток НА). Затем описанная выше последовательность выполнялась вновь с новыми значениями варьируемых переменных.

На выполнение одной такой оптимизационной итерации требуется порядка 3...3,5 часов. Главным образом данное время затрачивается на расчёт рабочего процесса в компрессоре. По этой причине решение проводилось с помощью программы параллельной оптимизации IOSO PM. При этом на каждом из компьютеров описанная выше цепочка выполнялась самостоятельно для одного из сочетаний варьируемых параметров. Один из компьютеров являлся главным управляющим модулем. Он собирал данные о ходе оптимизации со всех компьютеров, формировал оптимизируемую функцию и задавал новые значения варьируемых параметров – углов установки НА первой, второй и третьей ступеней.

При решении данной задачи оптимизации в сеть было объединено пять компьютеров. Для поиска оптимального решения оптимизатору потребовалось 102 обращения к расчётной модели (рассчитано 102 различ-

ных сочетания варьируемых переменных). Общее время расчёта составило более 150 часов компьютерного времени. История поиска показана на рис. 8. Начиная с 45 итера-

ции вычисляемая величина КПД мало меняется, что говорит о завершении процесса оптимизации. На рис. 9 приведено повышение КПД в зависимости от номера обращения.

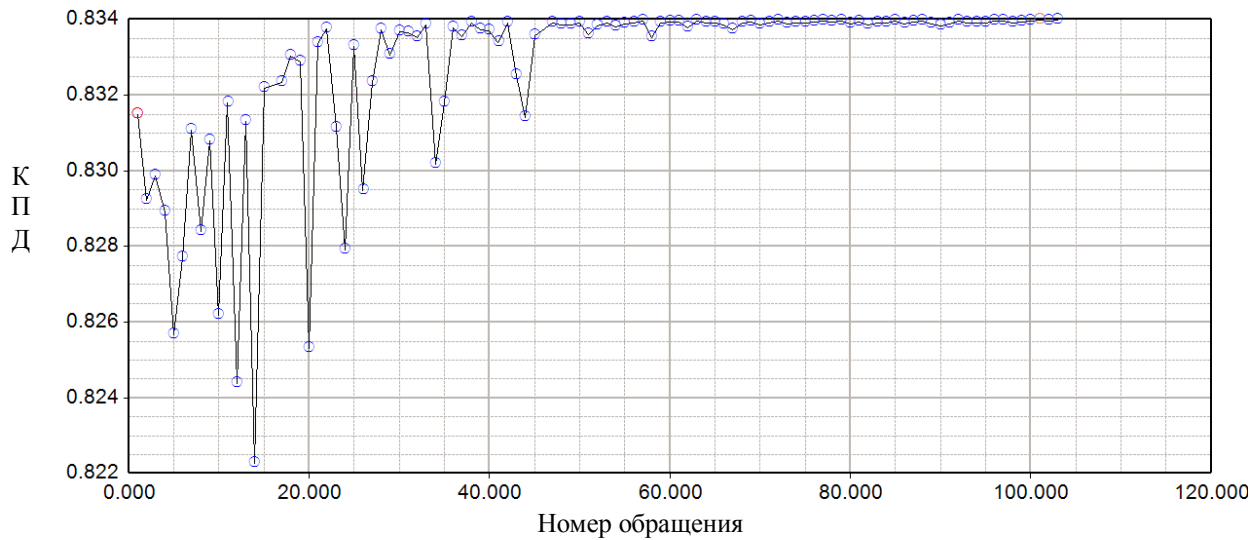


Рис. 8. История поиска при решении задачи оптимизации углов установки HA1, HA2, HA3

С помощью описанной выше технологии было найдено такое сочетание углов установки направляющих лопаток первой, второй и третьей ступени ком-

прессора, которое позволило получить максимальный выигрыш в КПД при сохранении неизменными других элементов конструкции КВД.

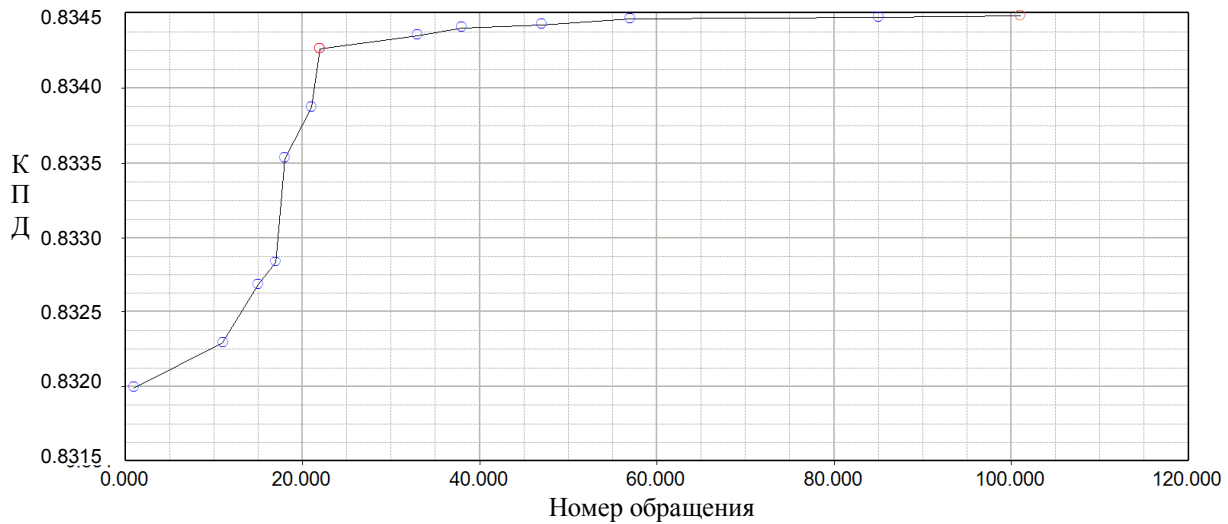


Рис. 9. Повышение КПД при решении задачи оптимизации

Обработка полученных результатов

Для окончательного варианта с найденными углами установки профиля HA первых трёх ступеней КВД был проведён расчёт напорных и КПД характеристик при двух значениях относительной приведённой частоты вращения: $\bar{n}_{np} = 0,95$ и $\bar{n}_{np} = 1$. Результаты расчётов представлены на рис. 10 и

11. Для сравнения на данных рисунках также приведены характеристики базового варианта КВД.

Из анализа характеристик следует, что уменьшение угла установки лопаток HA первых трёх ступеней КВД приводит к следующим результатам:

- КПД компрессора увеличивается примерно на 0,3% при $\bar{n}_{пр} = 0,95$ и $\bar{n}_{пр} = 1$;
- газодинамические запасы устойчивости КВД существенно не меняются;
- приведённый расход воздуха через компрессор снижается в среднем на 0,3 кг/с, что составляет примерно 1,3% от расхода воздуха через КВД.

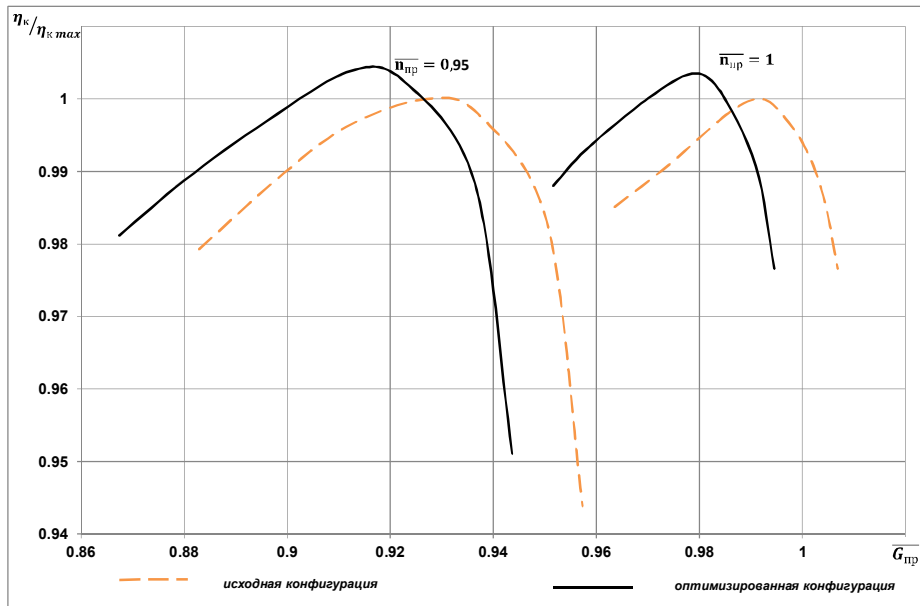


Рис.10. КПД характеристики базового и оптимизированного вариантов КВД

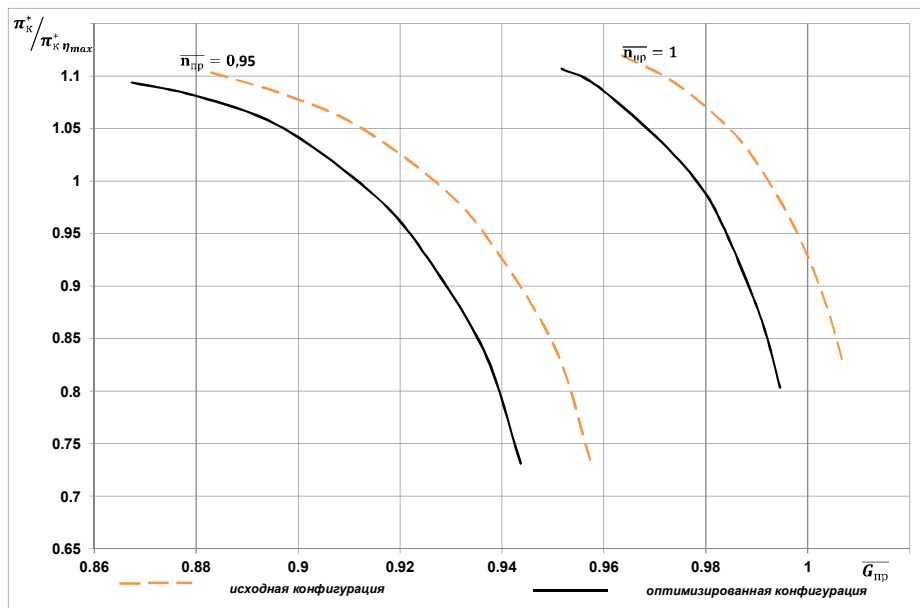


Рис.11. Напорные характеристики базового и оптимизированного вариантов КВД

Таким образом, при оптимизации КВД были решены следующие задачи:

- построена расчётная модель семиступенчатого компрессора высокого давления;
- проведено расчётное исследование рабочего процесса в КВД для базовой модели и модели с откорректированными лопатками НА первых трёх ступеней;
- найдены значения углов установки корректируемых лопаток НА, позволяющие повысить КПД компрессора;

- получены характеристики компрессора для базовой модели, проведено их сравнение с экспериментальными данными;
- получены характеристики компрессора для модели с откорректированными лопатками первых трёх ступеней компрессора.

Выполненная работа дала возможность определить оптимальные значения углов установки направляющих лопаток первых трёх ступеней многоступенчатого компрессора, позволившие на расчётном режиме увеличить КПД каскада на 0,3%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобр-

науки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation [Текст] / I.N. Egorov, M.L. Kuzmenko, Yu.N. Shmotin [et al.] // ASME paper GT2007-28205.
2. Дмитриева, И.Б. Автоматизация создания объёмной модели пера лопатки в ANSYS TurboGrid на базе традиционного представления его геометрии [Текст] / И.Б. Дмитриева, Л.С. Шаблий // Вестн. СГАУ. – Самара, 2011. – №3 (27). – Ч. 3. – С. 106-111.

IMPROVING THE HIGH PRESSURE COMPRESSOR EFFICIENCY BY OPTIMIZING THE STATOR BLADES ANGLES

© 2012 G. M. Popov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The optimization of multistage compressor of gas turbine engine is considered. Optimization was performed by changing the guide vanes angles of three stages. As a result the increasing of compressor efficiency by 0.3% was achieved on one of the main modes of operation.

Optimization, compressor characteristics, parametric model.

Информация об авторах

Попов Григорий Михайлович, инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: grishatty@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

Popov Grigory Mikhailovich, engineer of the Theory of Engine for Flying Vehicle Department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: grishatty@gmail.com. Area of Research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of the jet engines.