

УДК 621.45.37

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ СЕМИСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2012 Г. М. Попов, В. Н. Матвеев, О. В. Батулин, Д. А. Колмакова

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

Проведена оптимизация многоступенчатого компрессора ГТД за счёт изменения углов установки лопаток направляющих аппаратов трёх ступеней. В результате 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 непросто.

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 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 и решение задачи оптимизации;
- обработка результатов расчёта.

### Постановка задачи оптимизации

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

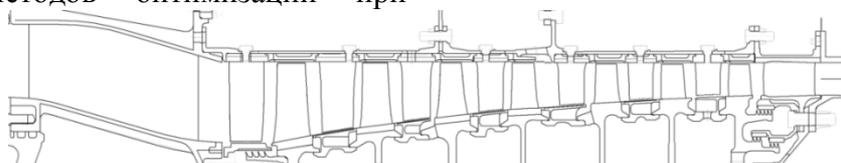


Рис. 1. Исследуемый КВД

В ходе решения задачи использовался только один критерий оптимизации: КПД компрессора в рабочей точке на крейсерской режиме работы ( $\bar{p}_{пр}=1$ ). Ограничение на положение рабочей точки (по расходу воздуха  $G$  и степени повышения давления  $\pi_k^*$ ) 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

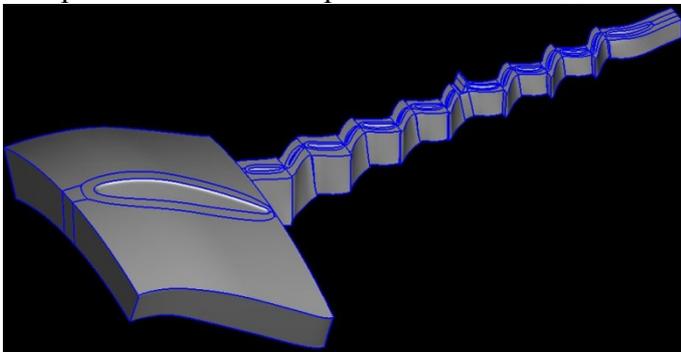


Рис.2. Пространственная геометрия расчётной области КВД

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 ( $\bar{p}_{пр}=1$ ). Расчёт неподвижной проточной части: опоры, входного направляющего аппарата (ВНА) и всех

компрессора (рис. 2) и разбиения её сеткой конечных элементов во встроенном сеткопостроителе программы Numeca – Auto Grid. Вся цепочка действий (запуск программ, запись файлов и построение сетки) выполняется связано, 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).

#### 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.

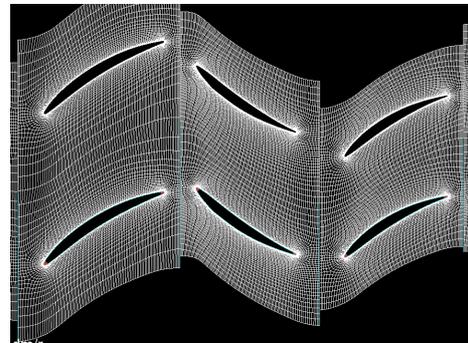


Рис.3. Сетка конечных элементов в межлопаточных каналах НА1, РК2 и НА2

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

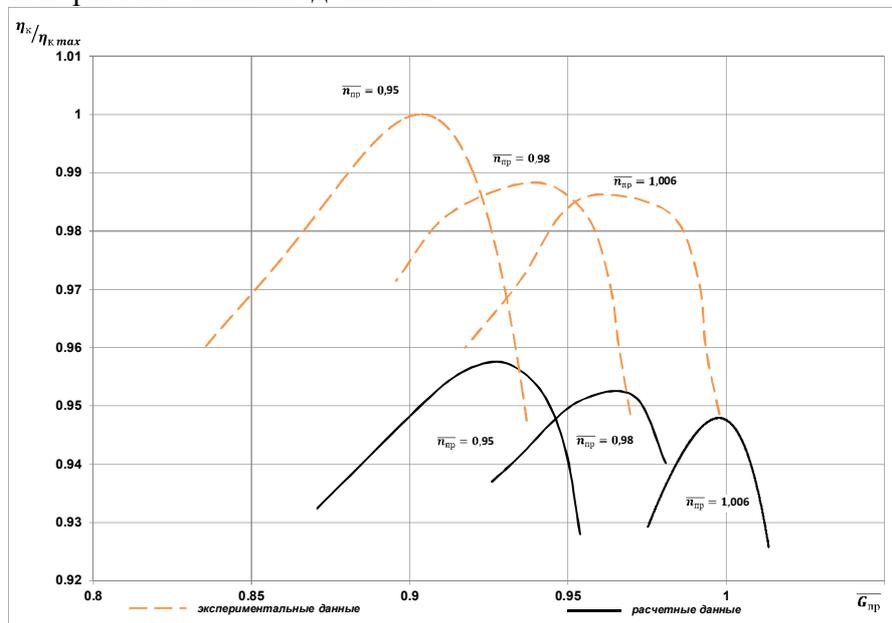


Рис.4. КПД-характеристики базового варианта КВД

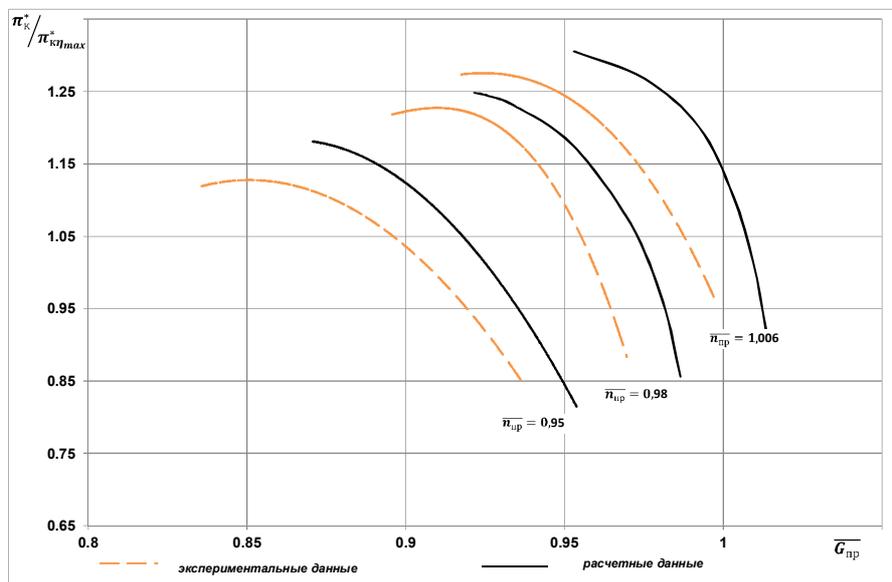


Рис.5. Напорные характеристики базового варианта КВД

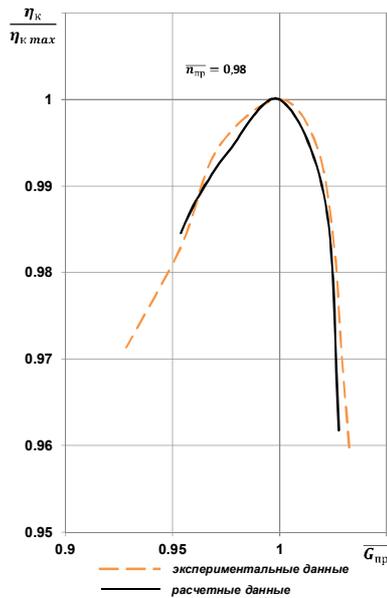


Рис.6. КПД-характеристики базового варианта КВД, соотнесенные по расходу воздуха

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%.

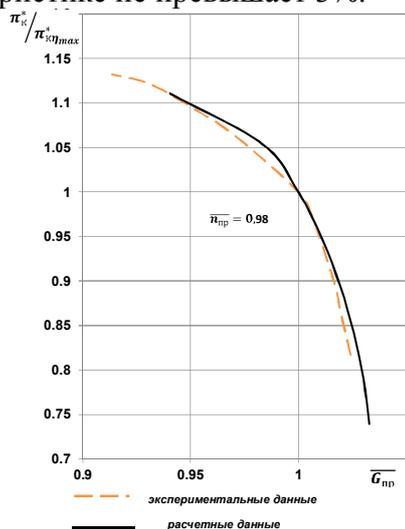


Рис.7. Напорные характеристики базового варианта КВД, соотнесенные по расходу

Все изменения, внесённые 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.

### 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 расчёта, 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 фазах.

Программный комплекс Numeca Fine Turbo применялся для расчёта рабочего процесса в компрессоре по созданной расчётной модели.

Последовательно под управлением программы IOSO выполнялся следующий алгоритм:

- задание в файле программы «Профилятор», описывающем 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 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, 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 задачи оптимизации в сеть было объединено пять компьютеров. Для поиска оптимального решения оптимизатору потребовалось 102 обращения к расчётной модели (рассчитано 102 различных сочетания варьируемых переменных). Общее время расчёта составило более 150 часов компьютерного времени. История поиска показана на рис. 8. Характерно, что начиная с 45 итерации, вычисляемая величина КПД мало меняется, что говорит о завершении процесса оптимизации. На рис. 9 приведено повышение КПД в зависимости от номера обращения.

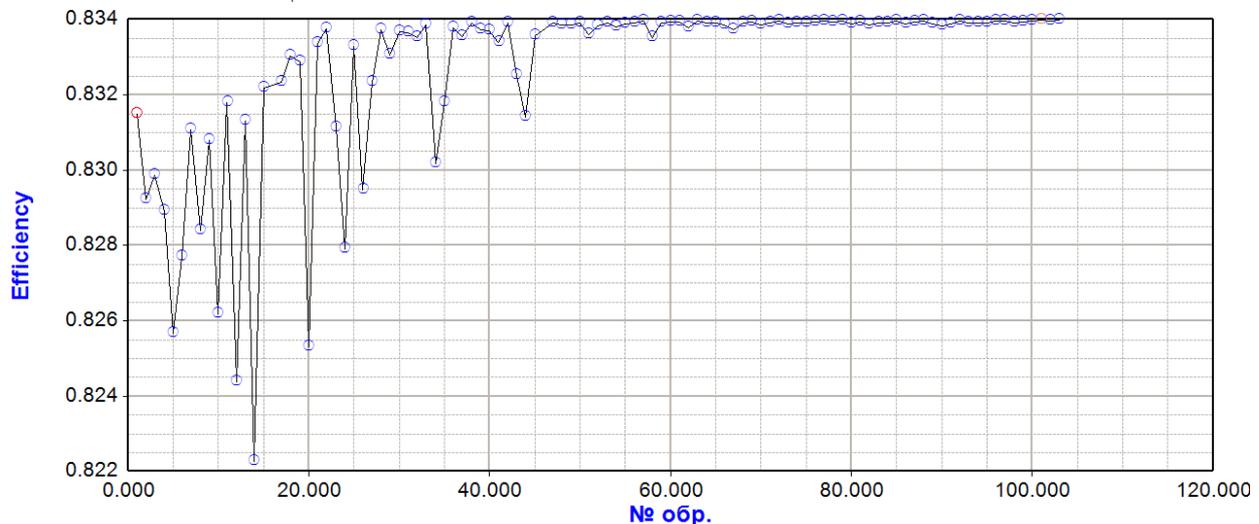


Рис. 8. История поиска при решении задачи оптимизации углов установки НА1, НА2, НА3

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

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

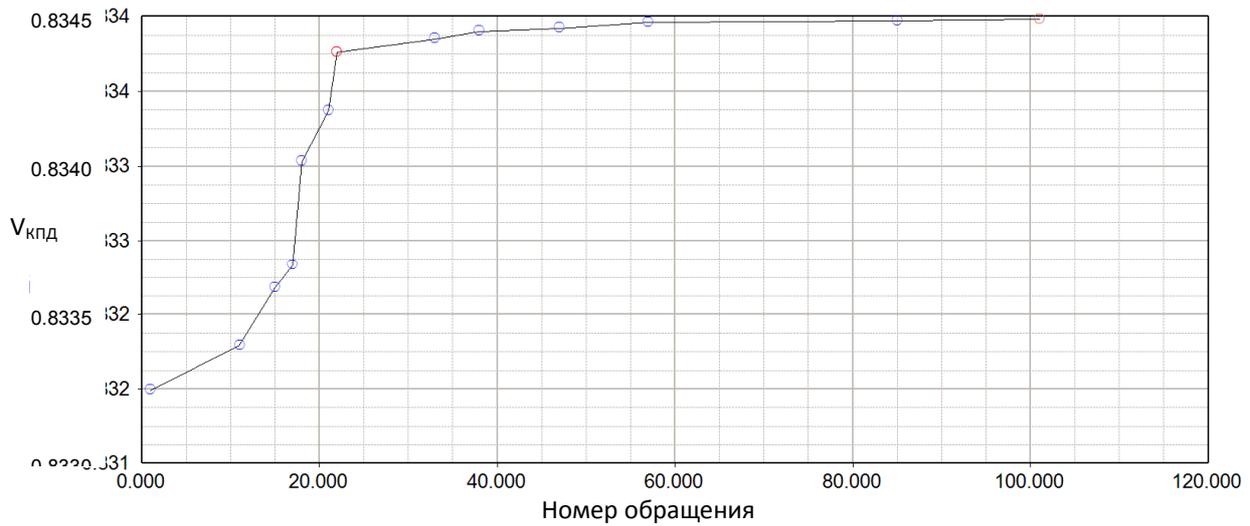


Рис.9. Повышение кпд при решении задачи оптимизации

**Обработка полученных результатов**

Для окончательного варианта с найденными углами установки профиля НА первых трёх ступеней КВД был проведён расчёт напорных и КПД характеристик при двух значениях относительной приведённой частоты вращения:  $\bar{n}_{пр} = 0,95$  и  $\bar{n}_{пр} = 1$ . Результаты расчётов представлены на рис. 10 и 11. Для сравнения на рисунках приведены характеристики базового варианта КВД.

Из анализа характеристик следует, что уменьшение угла установки лопаток НА

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.

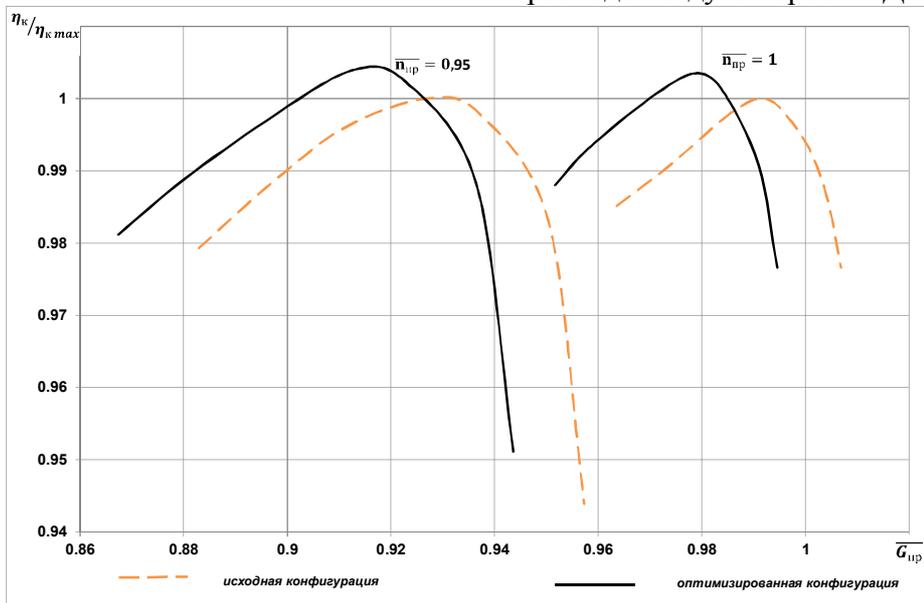


Рис.10. КПД характеристики базового и оптимизированного вариантов КВД

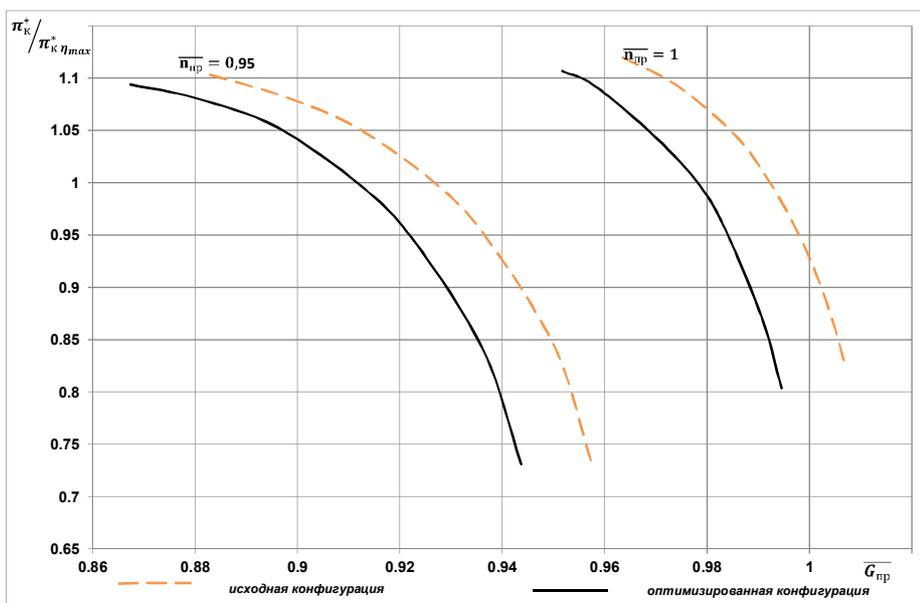


Рис. 11. Напорные характеристики базового и оптимизированного вариантов КВД

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 ступней;
- 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 ступней компрессора.

Выполненная работа дала возможность определить оптимальные значения углов установки направляющих лопаток первых трёх ступней

многоступенчатого компрессора, позволившие на расчётном режиме увеличить КПД каскада на 0,3%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### Библиографический список

1. Egorov, I. N., Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation [Текст] / I.N. Egorov, M.L. Kuzmenko, Yu.N. Shmotin, K.S. Fedechkin // 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. Шаблей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – Самара, 2011. – №3 (27). Часть 3. – С. 106-111.

## OPTIMIZATION OF AIRCRAFT SEVEN STAGE COMPRESSOR FIRST STAGES PARAMETERS

© 2012 G. M. Popov, V. N. Matveev, O. V. Baturin, D. A. Kolmakova

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, 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.

**Матвеев Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tdla@ssau.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, численные методы расчёта.

**Батулин Олег Витальевич** кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, агрегаты наддува ДВС.

**Колмакова Дарья Алексеевна**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет, E-mail: kolmakova.daria@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

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

**Matveev Valeriy Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department of aircraft engines theory, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). E-mail: tdla@ssau.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, numerical calculations.

**Baturin Oleg. Vital'evich** Candidate of Science, assistant professor of the chair of theory of engine for flying vehicle of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, turbocharger.

**Kolmakov Daria Alekseevna**, magstrand, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). E-mail: kolmakova.daria@gmail.com. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of the jet engines.