

УДК 621.452

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД С БОЛЬШОЙ СТЕПЕНЬЮ ДВУХКОНТУРНОСТИ

И.Н. ЕГОРОВ, Г.В. КРЕТИНИН, К.С. ФЕДЕЧКИН

Статья представлена доктором технических наук, профессором Никоновым В.В.

В статье рассматривается методика и результаты оптимизационного исследования с целью поиска варианта (или множества вариантов) геометрических параметров вентилятора, обеспечивающего как высокие уровни КПД на высоких приведенных частотах вращения, так и достаточные запасы газодинамической устойчивости на низких приведенных частотах вращения. Для решения такой многофакторной задачи проектирования вентилятора использовался CFD-код NUMECA Fine/Turbo для расчета характеристик вентилятора и алгоритм оптимизации IOSO NM для поиска множества компромиссных решений. В результате решения задачи оптимизации геометрических параметров лопаточного венца вентилятора получено увеличение запаса устойчивости на 4% в диапазоне частот вращения  $n_{пр}=70-100\%$  при незначительном уменьшении КПД.

### Введение

В процессе совершенствования элементов газотурбинных двигателей с целью повышения их топливной эффективности большое внимание уделяется аэродинамическому совершенству компрессоров. В частности при разработке нового вентилятора важно не только улучшить его показатели эффективности, но и сохранить требуемые эксплуатационные свойства по газодинамической устойчивости всего двигателя. В качестве примера можно привести двигатель Д-30КП-3, в котором в результате его модернизации трехступенчатый компрессор низкого давления был заменён высоконагруженным одноступенчатым вентилятором. При этом было сохранено реверсивное устройство ковшового типа (рис. 1). Опыт эксплуатации двигателей с реверсивным устройством данного типа показывает, что при его использовании рабочая линия на характеристики вентилятора приближается к границе его устойчивой работы (рис. 2) при включении реверса из-за его дросселирования. Поэтому с целью не ухудшения эксплуатационных свойств двигателя возникает задача поиска варианта (или множества вариантов) геометрических параметров вентилятора, обеспечивающего как высокие уровни КПД на высоких приведенных частотах вращения, так и достаточные запасы газодинамической устойчивости на низких приведенных частотах.

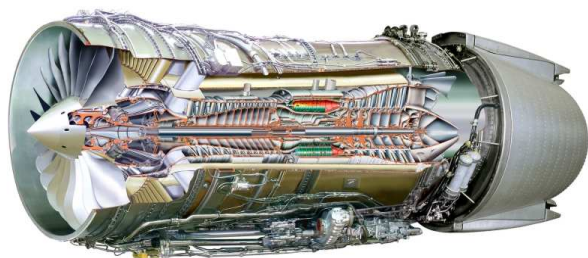


Рис. 1. Схема ТРДД

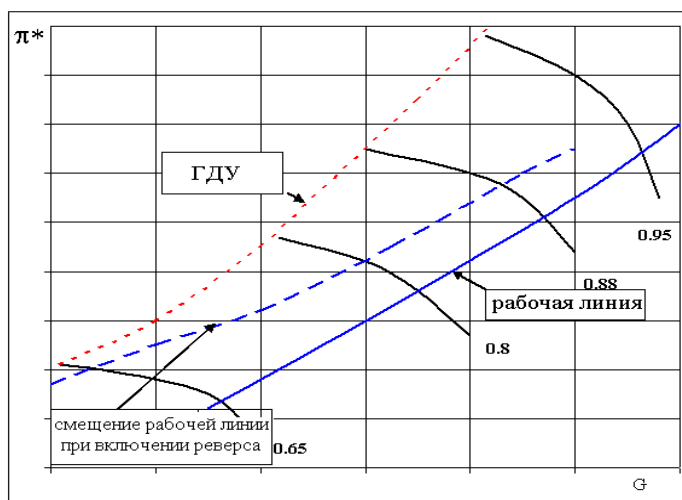


Рис. 2. Изменение положения рабочей линии на характеристики вентилятора при использовании реверса

Для решения такой многофакторной задачи проектирования вентилятора использовался CFD-код NUMECA Fine/Turbo [1,2] для расчета характеристик вентилятора и алгоритм оптимизации IOSO NM [3,4,5] для поиска множества компромиссных решений.

### Расчет течения в вентиляторе

Расчет характеристики вентилятора осуществлялся с использованием CFD-3D кода NUMECA Fine/Turbo, в котором реализовано численное решение уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Расчеты проводились с использованием однопараметрической модели турбулентности Spalart-Allmaras, которая обеспечивает удовлетворительное качество расчета при относительно небольших потребных вычислительных ресурсах.

Расчет характеристики исходного варианта вентилятора осуществлялся в геометрической компоновке с опорной ступенью и стойками разделительного корпуса (рис.3). В оптимизационных исследованиях при расчете напорных веток использовалась упрощенная геометрическая компоновка (один изолированный лопаточный венец рабочего колеса вентилятора). Расчетная сетка при решении задачи оптимизации строилась с использованием "IGG/Autogrid", это позволило автоматически формировать расчетную сетку по типовому шаблону для любой геометрии лопаточного венца, что важно для проведения численной оптимизации.

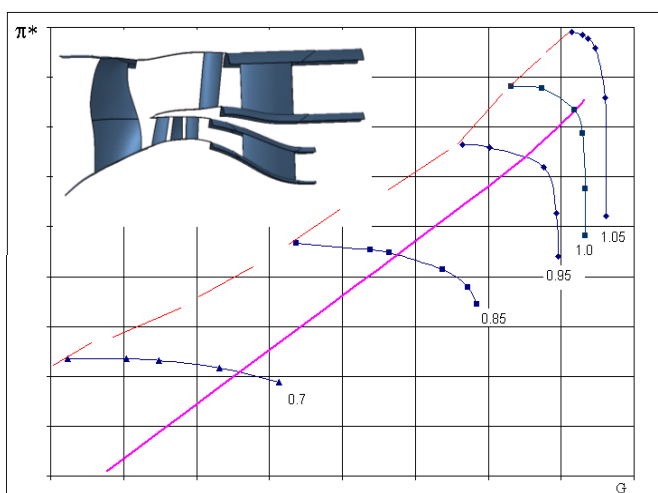


Рис. 3. Характеристика вентилятора

### Постановка задачи оптимизации

**Критерий:** увеличение значения запаса устойчивости вентилятора на частоте вращения 70%, где запас устойчивости определяется по формуле:  $\Delta K_y = \left( \frac{(\pi_a^* / G_a^*)_{\text{адд}}}{(\pi_a^* / G_a^*)_{\text{д.д}}} - 1 \right) \cdot 100\%$ .

**Ограничения:** на частоте вращения 95% уровень КПД более ( $\eta^* \geq 0.9$ ), запас устойчивости ( $\Delta K_y \geq \Delta K_{y\text{задан.}}$ ) в проектной точке не менее чем у исходного вентилятора, максимальный расход воздуха может меняться в диапазоне  $\pm 0,5\%$  (рис. 4).

**Газодинамическая модель вентилятора:** расчет характеристики вентилятора на частоте вращения 95% (в пяти точках напорной ветки) и на частоте вращения 70% (в трех точках напорной ветки).

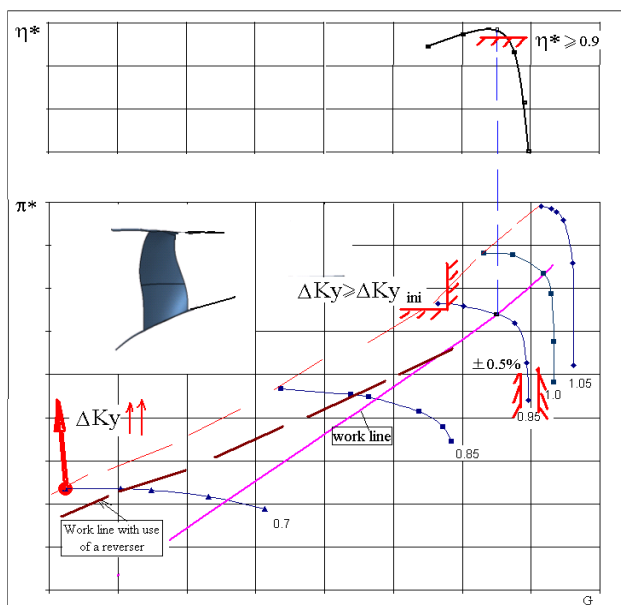


Рис. 4. Постановка задачи оптимизации (критерии и ограничения)

**Геометрическая модель вентилятора.** Анализ течения в исходном варианте вентилятора показал, что срыв потока формируется на низких частотах вращения в периферийных сечениях лопаточного венца. Поэтому наибольший эффект ожидается при изменении геометрической формы периферийных сечений лопатки рабочего колеса (рис. 5), а именно формы средней линии профиля. Форму средней линии профиля образует сплайн, проходящий через 5 реперных точек (рис. 6). Расстояние от реперной точки до некоторой базовой линии является варьируемой переменной, которая изменяется в заданном диапазоне. По высоте лопатки рабочего колеса рассматривалось шесть сечений.

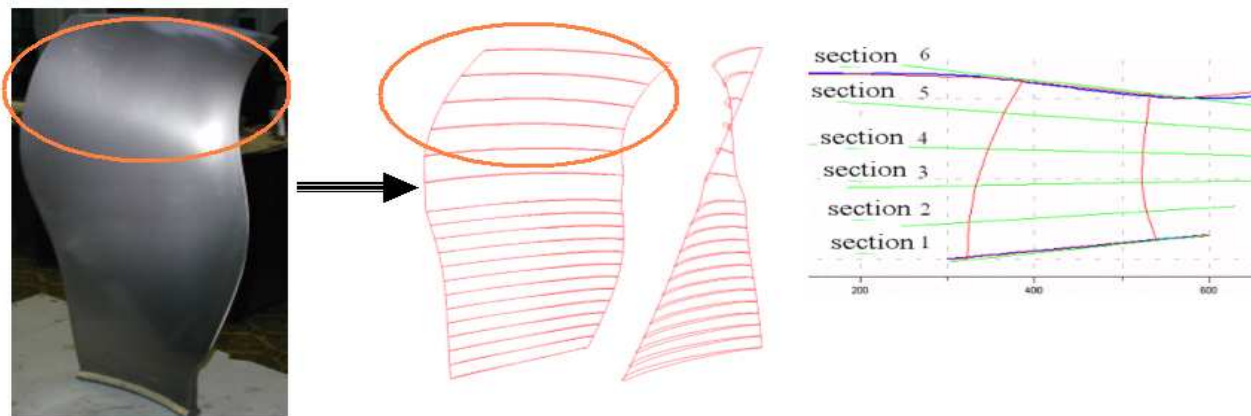


Рис. 5. Варьируемые сечения лопаточного венца вентилятора

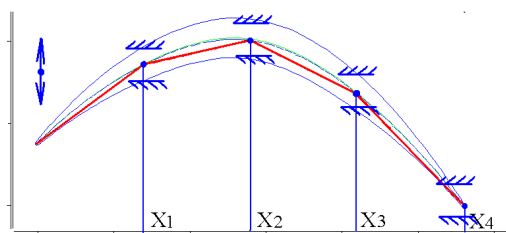


Рис. 6. Варьируемые реперные точки средней линии профиля

Таким образом общее количество варьируемых переменных задачи оптимизации - 24.

Изменение таких параметров лопаточного венца, как длина хорды, распределение толщины по хорде лопатки не рассматривалось, так как в этом случае возникает необходимость оценивать прочностные ограничения.

### Метод оптимизации

В качестве метода оптимизации использовался МНСО [3] - метод не прямой статистической оптимизации на основе самоорганизации. Данный метод основан на использовании технологии построения поверхностей отклика для аппроксимации целевой функции и ограничений.

На начальном этапе работы базового алгоритма МНСО формируется план эксперимента путем генерации случайных значений компонент вектора варьируемых переменных при равномерном распределении. Для всех точек из плана эксперимента осуществляется прямое обращение к математической модели, вычисляющей значения критерия оптимизации и ограничиваемых параметров. Минимальное потребное количество точек в плане эксперимента невелико и для задачи с размерностью 100 переменных может составлять 40...60 точек. В ходе решения задачи оптимизации было выполнено порядка 900 прямых обращений к модели вентилятора. Общая схема технологии оптимизации вентилятора представлена на рис. 7.

## Технология оптимизации

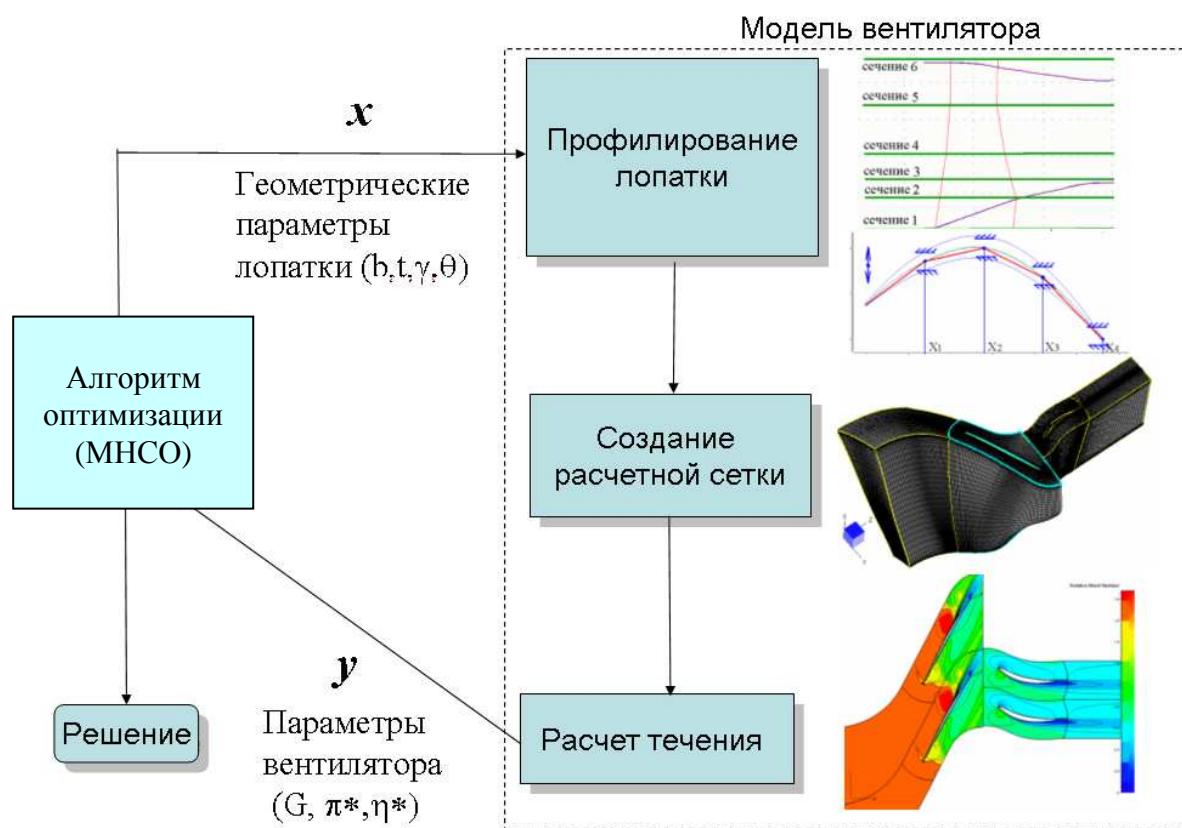


Рис. 7. Технология оптимизации геометрических параметров вентилятора

### Результаты решения задачи оптимизации

В результате решения данной задачи удалось получить множество различных геометрических форм лопаточных венцов, которые имеют большие запасы устойчивости как на частоте

вращения 70%, так и 95%, при незначительном уменьшении уровня КПД на частоте вращения 70% и 95% (рис. 8). Характеристики исходного варианта и одного из полученного оптимально-го множества представлены на рис. 9.

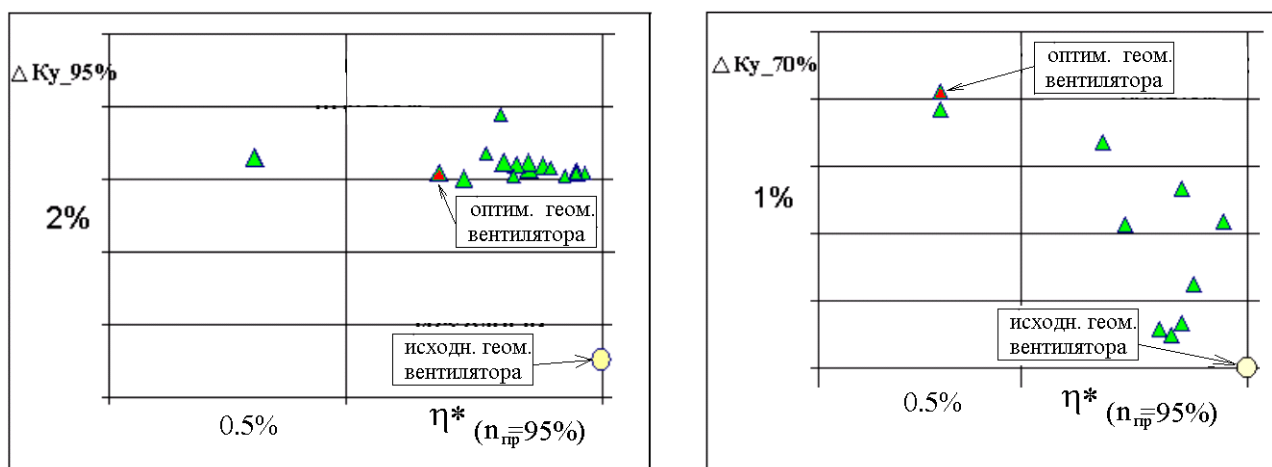
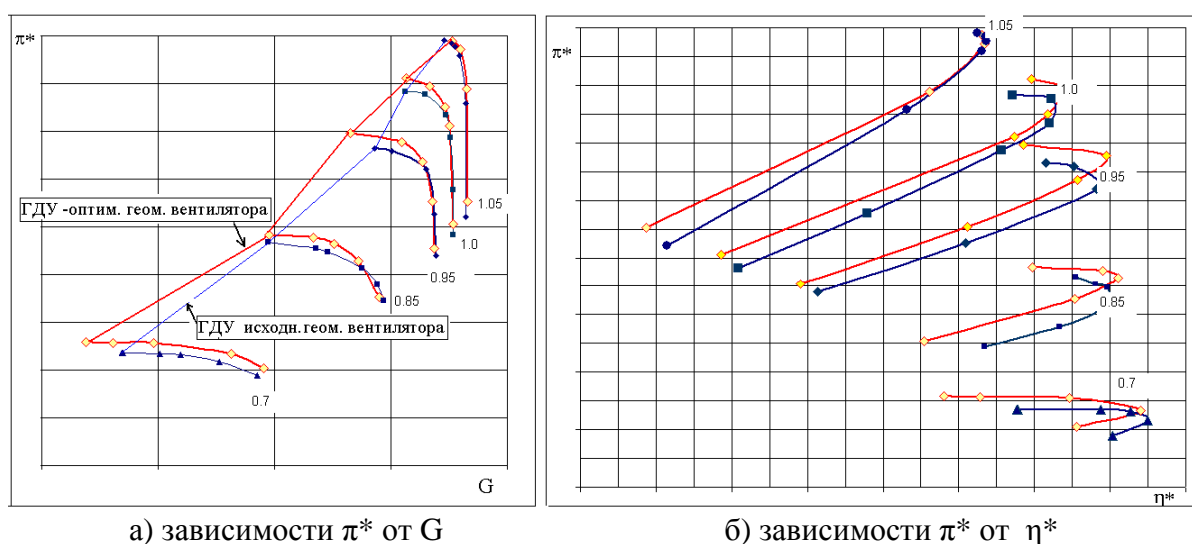


Рис. 8. Результат решения задачи оптимизации



а) зависимости  $\pi^*$  от  $G$

б) зависимости  $\pi^*$  от  $\eta^*$

Рис. 9. Характеристика вентилятора исходного и оптимального варианта

Сравнение геометрической формы периферийных сечений лопаточного венца исходного и оптимального показано на рис. 10. Рассматривая геометрические формы исходного лопаточного венца и полученного в результате оптимизации, можно выявить следующие особенности их изменения.

Абсолютные величины «деформации» формы профиля незначительны, максимальные изменения претерпели 1, 4, 5 сечения рабочего колеса. Профили сечений 3, 4, 5 приняли более выраженную S-образную форму, а в сечениях 1 и 2 увеличился угол изгиба средней линии профиля. Такое изменение периферийных сечений рабочего колеса привело к существенно неравномерному увеличению нагрузки по радиусу, что достаточно наглядно иллюстрирует рис. 11. Увеличение запаса устойчивости (примерно на 4%) произошло практически во всем диапазоне частот вращения. Причем, если увеличение степени повышения давления  $\pi^*$  наблюдается практически во всех измененных сечениях (в диапазоне частот вращения  $n_{пр}=70-95\%$ ), то уровень КПД в измененных сечения существенно зависит от рассматриваемой частоты вращения вентилятора.

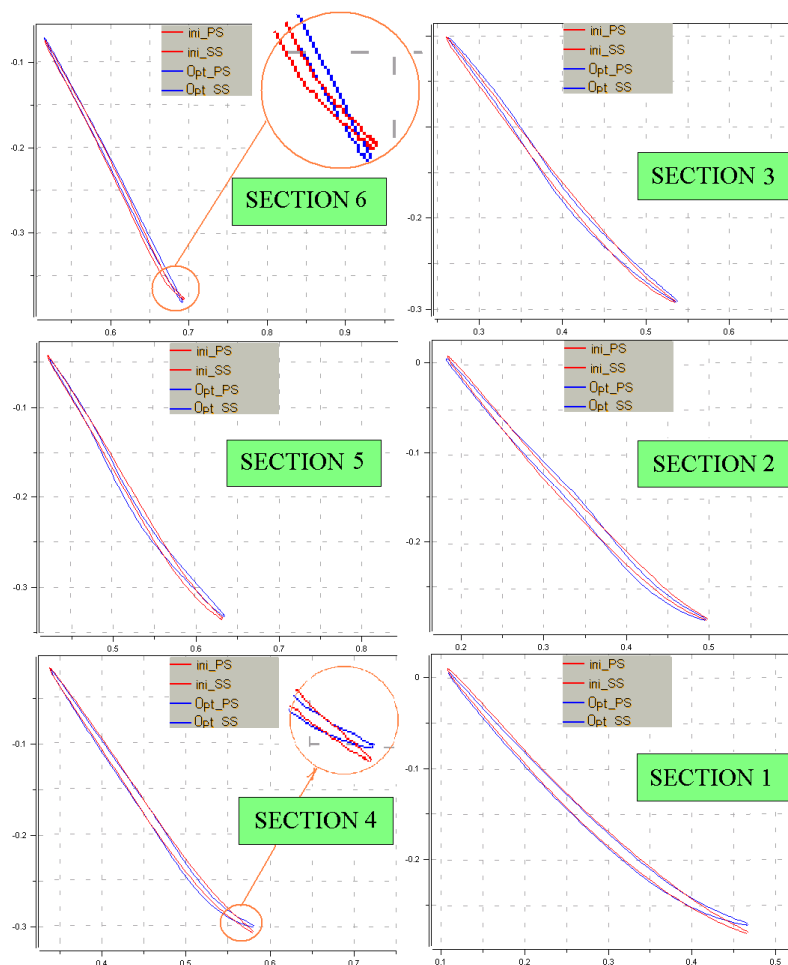
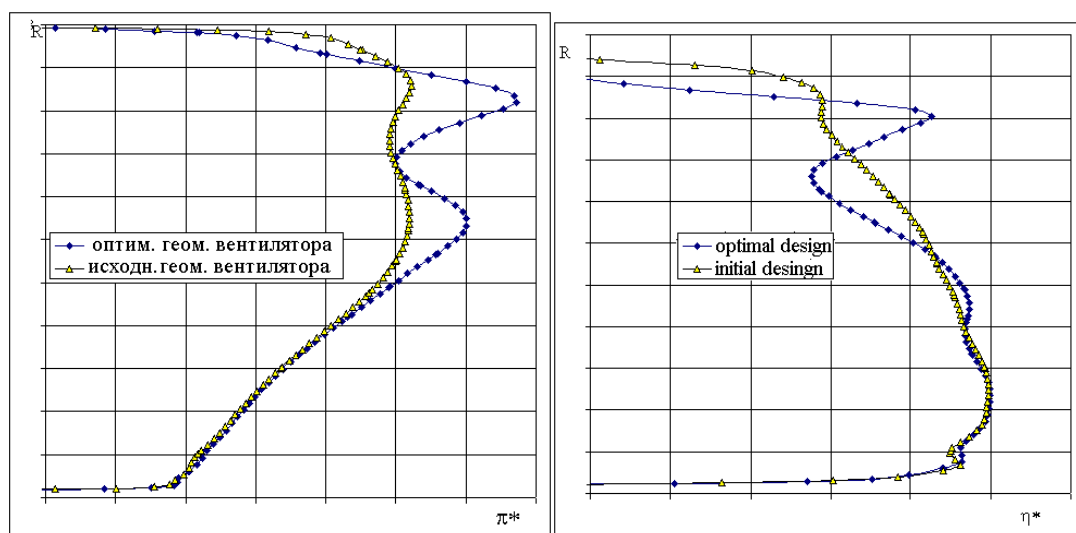


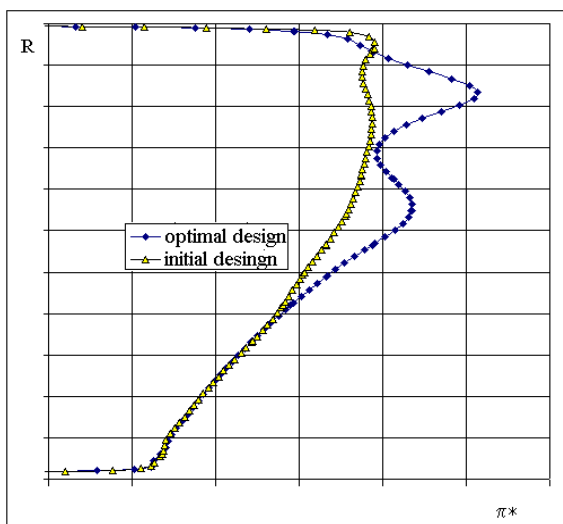
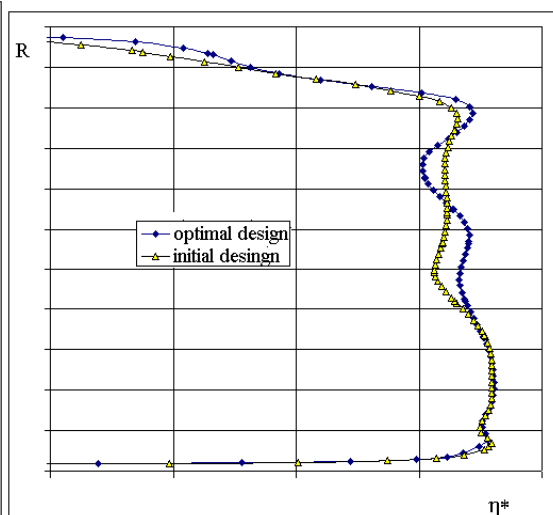
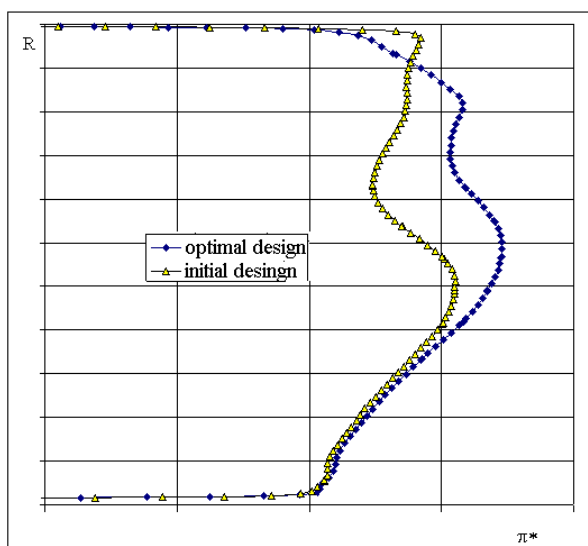
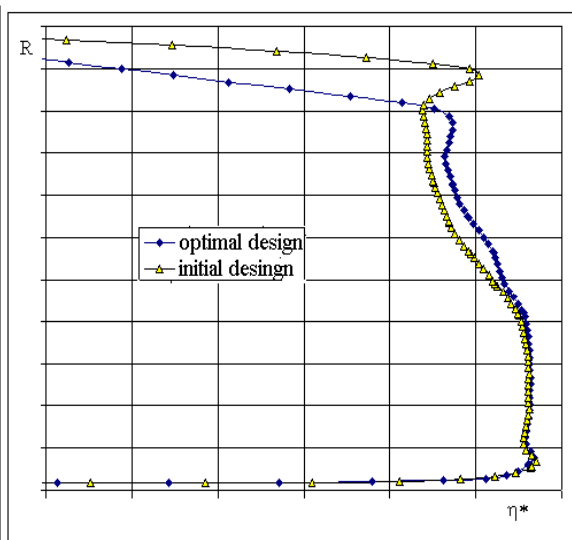
Рис. 10. Профили лопаточного венца исходного и оптимального варианта вентилятора



а) проектная точка ( $n_{пр} = 95\%$ )

б) проектная точка ( $n_{пр} = 95\%$ )

Рис. 11. Радиальные распределения  $\eta^*$  и  $\pi^*$  вентилятора

в) точка на рабочей линии ( $n_{пр} = 85\%$ )г) точка на рабочей линии ( $n_{пр} = 85\%$ )е) точка срыва ( $n_{пр} = 70\%$ )д) точка срыва ( $n_{пр} = 70\%$ )

### Продолжение рис. 11

Таким образом, проведенные исследования показали возможность проведения оптимизационных исследований с использованием трехмерных методик расчета течения в вентиляторе. Наиболее важными элементами в организации процесса оптимизации, которые существенно влияют на эффективность подобного рода исследования, являются возможность автоматической генерации расчетных сеток для широкой гаммы геометрии лопаточных венцов и эффективный алгоритм оптимизации, позволяющий при наименьшем количестве обращений к модели течения получать наибольший прирост целевой функции. В результате решения задачи оптимизации геометрических параметров лопаточного венца вентилятора получено увеличение запаса устойчивости  $\Delta K_u$  на 4% в диапазоне частот вращения  $n_{пр} = 70-100\%$  при выполнении всех наложенных на характеристики ограничений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Alain Demeulenaere, Alban Ligout, and Charles Hirsch. Application of Multipoint Optimization to the Design of Turbomachinery Blades.

2. NUMECA Int., 2000, "Numeca's Flow Integrated Environment for Turbomachinery and Internal Flows", User Manual, Numeca Int., Brussels, Belgium.
3. **Егоров И.Н.** и др. Методы не прямой статистической оптимизации на основе самоорганизации и их использование в оптимизационных задачах авиационных ГТД. -ВИНИТИ (2622-В89), 1988 г.
4. **Егоров И.Н., Кретинин Г.В., Федечкин К.С.** Оптимизационные исследования ступени осевого компрессора. Полет №12, 2007г.
5. Веб-ресурс компании «IOSO Technology Center» – <http://www.iosotech.com>.

## OPTIMIZATION STUDIES OF THE AIRCRAFT HIGH-BYPASS RATIO TURBO ENGINE FAN

**Egorov I. N., Kretinin G V., Fedechkin K. S.**

When improving elements of a gas-turbine engine to increasing the engine's fuel efficiency, a special attention is paid to aerodynamic quality of a compressor. Because of that in order not to worsen the engine operating characteristics one has to pose the problem of searching for such fan configuration (or configurations) that provides both the high efficiency at high operating frequencies and sufficient gas-dynamic stability margins at low operating frequencies. To solve such a multifactor fan design problem we used CFD code NUMECA Fine/Turbo for computing fan characteristics and IOSO-NM multicriteria optimization technology for searching for compromise solutions. As a result of solving the problem of optimizing the fan blade ring geometrical parameters the stability margin,  $\Delta K_y$ , was increased by 4% in the rotational frequencies range of 70% to 100% while satisfying all the constraints imposed on the characteristics.

### Сведения об авторах

**Егоров Игорь Николаевич**, 1957 г.р., окончил РВВУ им. Я. Алксниса (1979), член Международного оргкомитета по многодисциплинарной оптимизации Американского института аэронавтики и астронавтики (AIAA), эксперт Американского института инженеров-механиков (ASME), член Международного общества по оптимизации (ISSMO), академик Российской академии космонавтики им. К.Э.Циолковского, академик Академии авиации и воздухоплавания, доктор технических наук, профессор, заместитель ГК по системному анализу НПО «Сатурн», автор более 100 научных работ, область научных интересов - математическое моделирование рабочего процесса авиационных силовых установок, методы и алгоритмы численной оптимизации.

**Кретинин Геннадий Валентинович**, 1962 г.р., окончил МФТИ (1985), член-корреспондент Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, академик Академии авиации и воздухоплавания, доктор технических наук, профессор, начальник отдела многодисциплинарной оптимизации НПО «Сатурн», автор более 100 научных работ, область научных интересов - математическое моделирование рабочего процесса авиационных силовых установок, методы и алгоритмы численной оптимизации.

**Федечкин Константин Сергеевич**, 1975 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1998), кандидат технических наук, начальник отделения научно-исследовательского отдела ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, автор 40 научных работ, область научных интересов - математическое моделирование течения в осевых компрессорах газотурбинных двигателей, оптимизация элементов авиационных газотурбинных двигателей.