

УДК 621.515-001.26

М.Ю. ШЕЛКОВСКИЙ*ГП НПКГ “Зоря”–“Машипроект”, Николаев, Украина*

МЕТОД АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ КОМПРЕССОРА

В данной работе рассмотрен метод аэродинамического совершенствования лопаточных венцов компрессора, на основе симплекс-метода прямой оптимизации, а также с использованием центрального композиционного планирования и дальнейшей оптимизации по поверхности отклика. Для расчетов трехмерного вязкого сжимаемого течения применяется программный комплекс ANSYS CFX. Рассмотрены основные результаты расчетов характеристик различных компрессорных решеток с оптимальным профилированием лопаточных венцов. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработанного метода.

Ключевые слова: компрессор, оптимизация, средняя линия, навал, характеристика, коэффициент потерь.

Введение

Для современных компрессоров характерно уменьшение числа ступеней с одновременным ростом общей степени повышения давления и КПД [1]. С целью повышения аэродинамической эффективности лопаточных венцов компрессора на сегодняшний день применяются различные мероприятия, связанные с изменением их геометрии: навал [2], стреловидность [3], парусность профиля пера лопатки [4], изменение конфигурации входной кромки [5], полировка поверхностей лопаток [6], применение профилей с “управляемой” диффузностью [7, 8] и т.д. Исследования в этом направлении целесообразно проводить путем введения указанных изменений геометрической формы пера лопатки в методы расчета трехмерного вязкого течения.

1. Постановка задачи

Благодаря детальным исследованиям потока в межлопаточных каналах ступеней компрессора установлено, что он трехмерный, вязкий, сжимаемый, нестационарный, с достаточно сложной структурой течения: с наличием пограничных слоев на ограничивающих проточную часть кольцевых поверхностях и поверхностях лопаток, аэродинамических следов за ними, перетеканий пограничных слоев на лопатках в радиальном направлении под действием центробежных сил, перетеканий в радиальных зазорах, завихряющих выходной поток и придающих ему трехмерность [4, 9]. Математическое описание вышеизложенных свойств течения возможно с по-

мощью системы трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа [10]. Их решение путем прямого численного моделирования при больших числах Рейнольдса затруднено вследствие ограничения по компьютерной памяти, поэтому на сегодняшний день существует множество методов расчета, в которых используются различного уровня упрощения этой системы [11]. Квазитрехмерные методы, как правило, используемых при решении обратной задачи недостаточно для описания эффектов взаимодействия сечений по высоте лопатки, особенно сильных в концевых облатсях, в том числе в области радиального зазора. Поэтому необходимы поиски путей учета трехмерности и вязкости потока при проектировании, с применением современных программных комплексов.

Моделирование трехмерного вязкого сжимаемого течения при числах $Re > 10^6$ на сегодняшний день в инженерной практике осуществляется с помощью RANS-методов, основанных на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Фавру). В настоящее время существуют соответствующие программные комплексы FlowER, Numeka, ANSYS CFX, Fluent, FlowVision, STAR-CD и т.д. Опыт расчетов течений в турбомашинах показывает, что точность решения в каждом из них зависит в основном от качества сетки, способа постановки граничных условий, свойств численного алгоритма, выбора модели турбулентности (учитывающей вязкие и турбулентные эффекты) [12].

Эффективное использование методов расчета трехмерного вязкого течения позволяет оценить вводимые конструктивные мероприятия по аэродинамическому совершенствованию лопаточной сис-

темы компрессора. а также оптимизировать геометрию лопаток в однокритериальной или многокритериальной постановке [13]. Однако, поиск оптимального решения даже применительно к одной ступени – чрезвычайно сложная задача. Основными её проблемами являются: многокритериальность и многопараметричность, отсутствие информации о влиянии параметров на результат расчета ввиду наличия существенного взаимодействия между источниками потерь, сложность многофакторного моделирования рабочего процесса компрессора и получения параметрической геометрической модели его проточной части и т.д. Экспериментальных исследований, в которых были бы рассмотрены результаты такого совершенствования, крайне мало. Кроме того, методы решения обратной задачи, как правило, являются “ноу-хау” разработчиков и не афишируются. Поэтому разработка методов совершенствования лопаточных венцов компрессора путем дальнейшего развития решения трехмерных уравнений течения вязкого газа в форме Навье-Стокса по-прежнему является актуальной задачей.

2. Решение задачи

Задача формирования пространственной поверхности пера лопатки с оптимизацией геометрических параметров лопаточных венцов рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА) в составе осевой ступени компрессора решалась в данной работе на основе используемого на предприятии “Зоря”-“Машпроект” комплекса программ “Kompres” и коммерческого пакета программ ANSYS [14].

Формирование исходной геометрии профиля пера лопатки РК (НА) выполняли упрощенным путем по плоским сечениям с использованием системы автоматического проектирования “Kompres”. Метод проектирования лопаточных венцов компрессора по среднему радиусу представляет собой систему газодинамических уравнений для идеального газа, а также соотношений между углами и скоростями потока (треугольниками скоростей) в межвенцовых зазорах [15]. При заданных исходных данных (расходе воздуха G_B , частоте вращения, степени повышения полного давления π_K^* , параметрах на входе) осуществляется выбор формы проточной части, числа ступеней, геометрии лопаточных венцов компрессора на среднем радиусе при принятом законе изменения осевой скорости, коэффициента напора, КПД, степени реактивности по ступеням. Расчет течения вдоль линий тока по высоте проточной части компрессора представляет собой обратную двумерную осесимметричную задачу для сжимаемого газа, в основу которой положен метод кривизны

линий тока. Расчет геометрии решетки РК (НА) по вычисленным параметрам потока выполняется посредством определения угла отставания на выходе из решетки. Кроме того, вводится навал и изменение формы средней линии с помощью подходов, изложенных в [16].

Аэродинамическое совершенствование лопаточных венцов выполняем путем деформирования исходного профиля по сечениям лопатки, с применением либо симплекс-метода [17] согласно структурной схеме, приведенной на рис. 1, либо центрального композиционного планирования (ЦКП) и дальнейшей оптимизации по поверхности отклика (рис. 2). В качестве исходных данных в каждом из подходов использованы результаты начального расчета геометрии лопаточных венцов по высоте, координаты меридиональных обводов проточной части, шаг варьирования - изменения геометрических параметров, а также ограничения, накладываемые как на диапазон их изменения, так и на значения отдельных аэродинамических переменных.

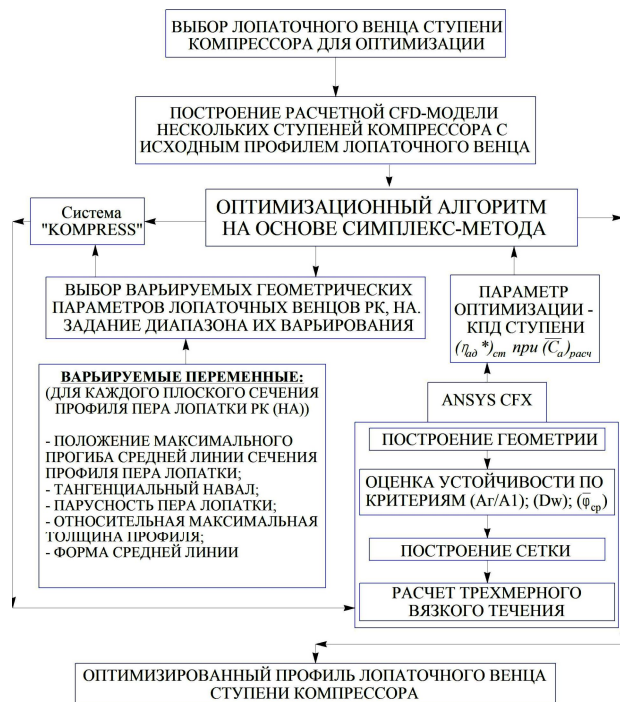


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого метода аэродинамического совершенствования лопаточных венцов ступени компрессора на основе симплекс-алгоритма прямой оптимизации

В случае использования симплекс-метода прямой оптимизации варьируемыми переменными являются: положение максимального прогиба средней линии сечения профиля пера лопатки (\overline{X}_{f_i}); тангенциальный навал (θ_i); парусность пера лопатки $V_{пер}/V_{ср}$; относительная максимальная толщина

сечения профиля $\overline{C_{m i}}$; параметр P_{Si} , характеризующий S-образность формы средней линии сечения профиля пера лопатки [16]. Ввиду ограничения числа варьируемых переменных такую оптимизацию рассматриваем как “условную”. Задание исходного симметричного профиля путем подключения соответствующей библиотеки, формирование твердотельной модели профиля пера лопатки, построение сеточных поверхностей, запуск расчета обтекания межлопаточных каналов компрессора в трехмерной вязкой постановке на основе решения RANS-уравнений осуществляется в ПК ANSYS в полуавтоматическом режиме.

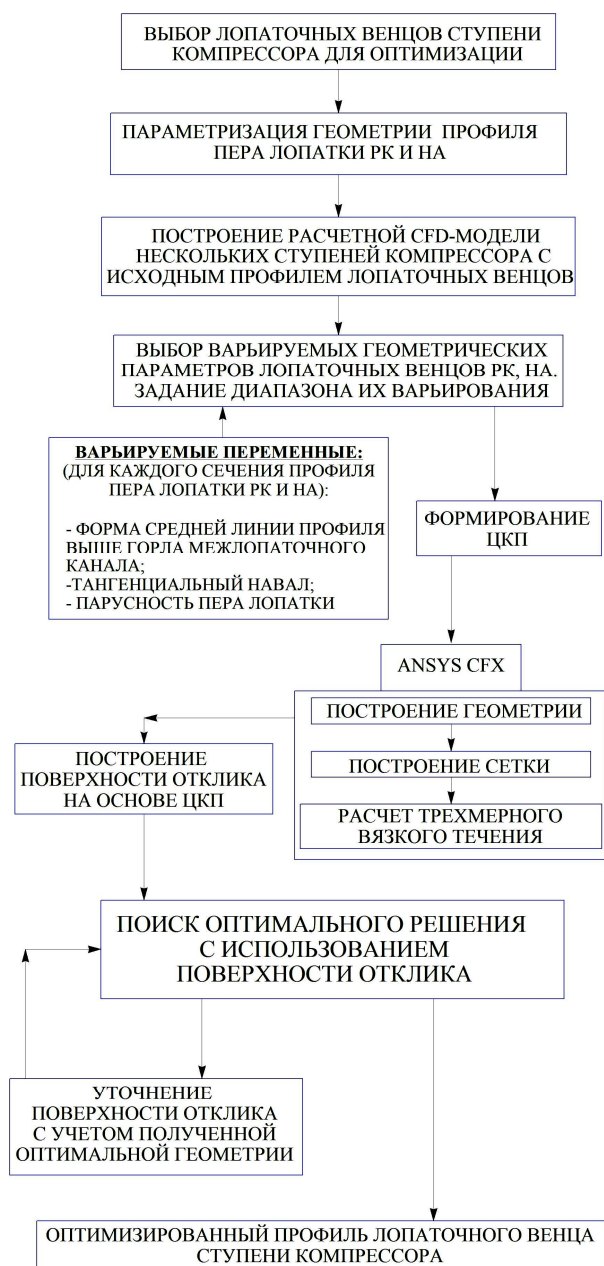


Рис. 2. Структурная схема предлагаемого метода аэродинамического совершенствования лопаточных венцов ступени компрессора на основе ЦКП и оптимизации по поверхности отклика

Целевой функцией является изоэнтропический КПД ступени ($\eta_{ст}^*$) либо коэффициент восстановления полного давления в решетке. Учитывая наличие погрешности вычисления $\eta_{ст}^*$ в CFD-расчете, при сопоставлении эффективности компрессорных решеток использовали не абсолютное значение $\eta_{ст}^*$, а его изменение относительно исходной величины. Оценку границы устойчивой работы компрессорной решетки с новой формой средней линии выполняли по значениям трех критериев устойчивости D , $\Phi_{ср}$ и A_r/A_1 [18].

Управляющая программа на основе симплекс-метода реализована в Excel (“Smpl_1.xls”). Пересчет координат исходного симплекса в физические переменные осуществляли по формуле [17]:

$$x_i = x_{0i} + \Delta x_i \cdot X_i. \quad (1)$$

При движении к оптимуму координаты каждого нового численного эксперимента находим по формуле:

$$x_i = \frac{2}{n} \cdot \left(\sum_{j=1}^{n+1} x_{ji} - x_i^* \right) - x_i^*, \quad (2)$$

где j - номер опыта; i - номер фактора; n - число факторов; x_i^* - значение i -го фактора в наихудшем опыте предыдущего симплекса.

В соответствии с предлагаемой схемой для метода аэродинамического совершенствования лопаточных венцов ступени компрессора на основе ЦКП и дальнейшей оптимизации по поверхности отклика (рис. 2), для выбранного диапазона изменения тангенциального навала, парусности, S-образности формы средней линии каждого из конических сечений по высоте профиля пера лопатки выполняются расчеты на основе сформированных центральных композиционных планов (ортогональных или ротортабельных) [17]. Далее, поиск оптимальной геометрии лопаточных венцов осуществляется с использованием полученной поверхности отклика, для различных значений входных аргументов. При большом числе варьируемых переменных выполняется 5-7 итерационных приближений, с уточнением поверхности отклика. Отличительной особенностью в постановке задачи является одновременное варьирование геометрических параметров как РК, так и НА ступени. Кроме того, все расчеты выполняются в системе нескольких предыдущих и последующих ступеней многоступенчатого компрессора, с целью учета эффектов их взаимного влияния. В качестве целевых функций используются:

1. Максимум КПД ступени:

$$F_1 = \eta_{ст}^*. \quad (3)$$

2. Минимизация функции, определяющей скорость изменения числа Маха вдоль спинки профиля в нескольких сечениях по высоте пера лопатки (для обеспечения равномерного распределения скорости вдоль профиля):

$$F_2 = \int_{M_{\max \text{ сп}}}^1 \left(\frac{d^2 M_{\text{сп}}(s)}{ds^2} \right)^2 ds, \quad (4)$$

где s - длина средней линии сечения профиля.

3. Минимизация функций, определяющих равномерность распределения скоростей по шагу на выходе из межлопаточных каналов решетки в нескольких сечениях по высоте пера лопатки:

$$F_3 = \int_0^t \left(\frac{dM}{ds} \right) dt; \quad F_4 = \int_0^t \left(\frac{d^2 M}{ds^2} \right) dt, \quad (5)$$

где t - шаг решетки на выходе.

Формирование твердотельной модели профиля пера лопатки, построение сеточных поверхностей, расчет трехмерного вязкого сжимаемого течения выполняются автоматически с помощью программного комплекса ANSYS CFX. Основные настройки решателя (при построении сетки, задании граничных условий) рассмотрены в работе [12].

3. Экспериментальные исследования

С целью экспериментальной проверки эффективности разработанного симплекс-метода прямой оптимизации лопаточных венцов ступени компрессора, на стенде статических продувок ГП НПКГ “Зоря”-“Машпроект” (рис. 3) были исследованы характеристики решетки выходного спрямляющего аппарата (ВСА) компрессора низкого давления стационарного ГТД с оптимизированным профилем, особенностью которого являлся большой угол изгиба ($\theta=60^\circ$). Варьируемыми переменными при этом являлись форма средней линии и распределение толщины профиля вдоль средней линии. Целевой функцией являлся коэффициент восстановления полного давления в решетке.

Модель препарировалась датчиками для измерения параметров потока (рис. 3) в сечениях: I-I на входе в решетку (измерялось избыточное полное давление двумя вертикальными семиточечными гребенками); II-II на входе в решетку (измерялось статическое давление девятью приемниками); III-III на выходе из решетки (измерялось статическое давление десятью приемниками); IV-IV, на выходе из решетки. В процессе испытаний проводилось траверсирование проточной части модели вдоль фронта решетки комбинированным пневмонасадком и шаговой гребенкой приемников полного давления. При обработке результатов средние значения величин

измеряемых параметров определялись интегрированием в пределах одного шага.

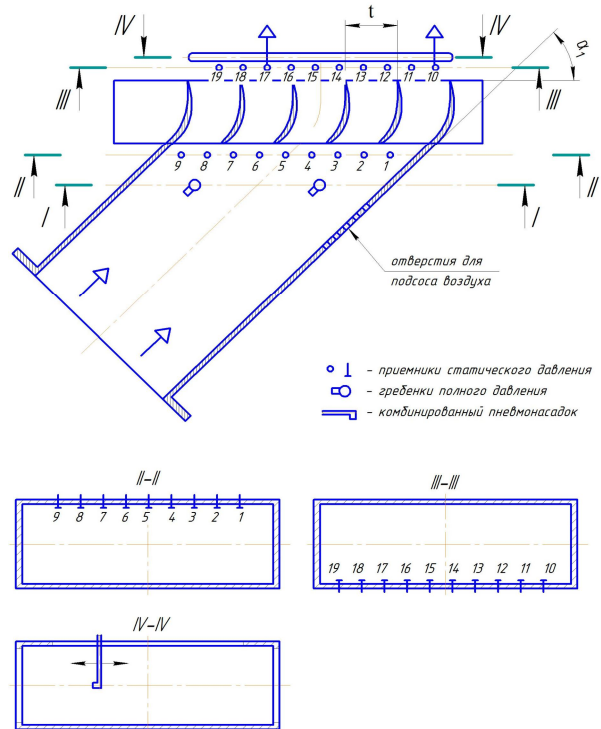


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для продувки моделей ВСА

В результате исследований было установлено, что в оптимизированной решетке профилей коэффициент гидравлического сопротивления уменьшился на (1,4...5,3)% (абс.) по отношению к исходному варианту в диапазоне углов атаки $i = (-14)^\circ \div (+6)^\circ$. При этом закрочный след от лопатки стал более узким (рис. 4), что выразилось в увеличении среднеинтегрального по шагу коэффициента восстановления полного давления: $\sigma_{\text{ср}} = 0,988$ в оптимизированной решетке, против $\sigma_{\text{ср}} = 0,977$ в исходной решетке профилей (рис. 5).

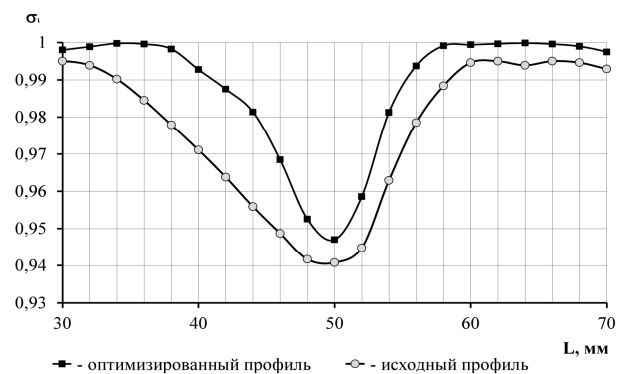


Рис. 4. Сопоставление коэффициентов восстановления полного давления в среднем сечении по высоте проточной части для исходной и оптимизированной решетки профилей по шагу, на расчетном режиме $\lambda=0,53$

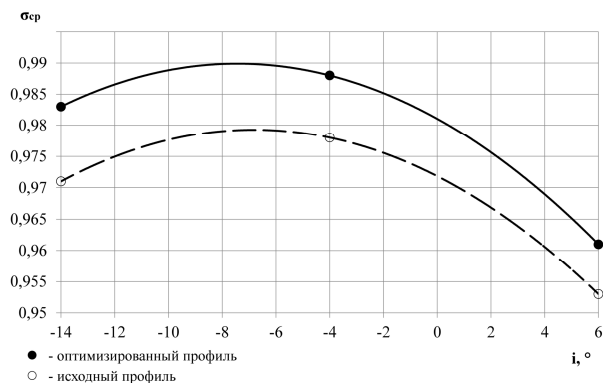


Рис. 5. Сопоставление коэффициентов восстановления полного давления модели для исходной и оптимизированной решетке профилей при различных углах атаки на расчетном режиме работы

4. Расчетные исследования

Предложенный метод аэродинамического совершенствования лопаточных венцов ступени компрессора на основе ЦКП и оптимизации по поверхности отклика апробировался при доводке первых двух ступеней компрессора стационарного малоразмерного ГТД [19]. Процесс оптимизации выполнялся последовательно, для каждой из ступеней компрессора. Профиль пера лопатки как РК, так и НА ступени задавался 7-ью сечениями по высоте. Основными варьируемыми переменными являлись: тангенциальный навал профиля пера лопатки РК, НА, а также S-образность каждого из 7-ми сечений как РК, так и НА (рис. 6).

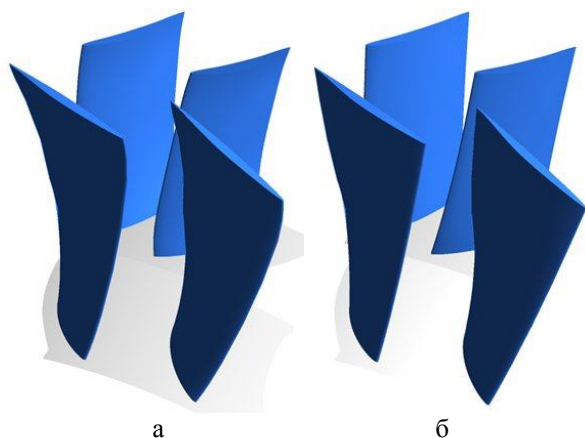


Рис. 6. Вид лопаточных венцов ступени компрессора оптимизированного (а) и исходного (б) вариантов

Целевой функцией являлся изоэнтروпический КПД ступени, а также равномерность распределения скоростей по шагу на выходе из межлопаточных каналов решетки, при фиксированном диапазоне возможного изменения коэффициентов расхода и напора. В результате оптимизации изоэнтропический КПД первой ступени возрос на 1,0% (рис. 7, а),

а КПД второй ступени на 1,1% (рис. 7, б). При этом КПД группы ступеней (1-3) повысился на (0,9)% (рис. 8).

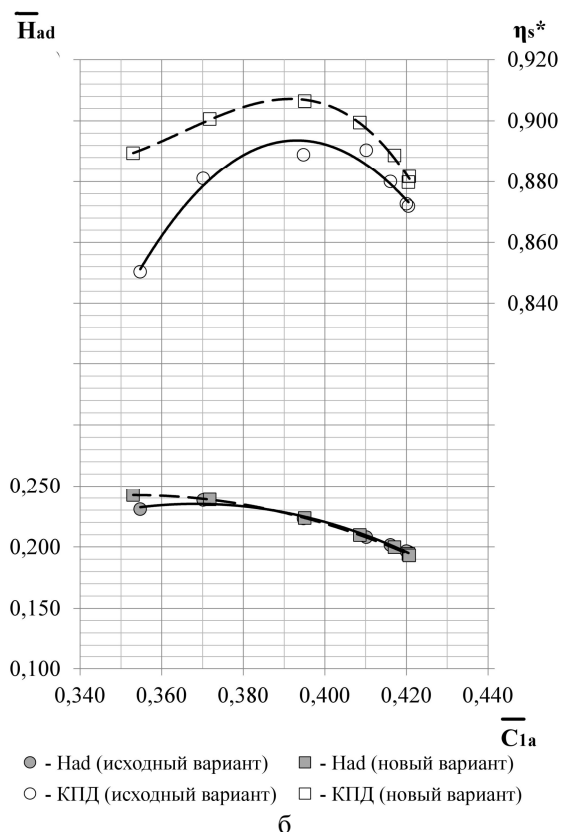
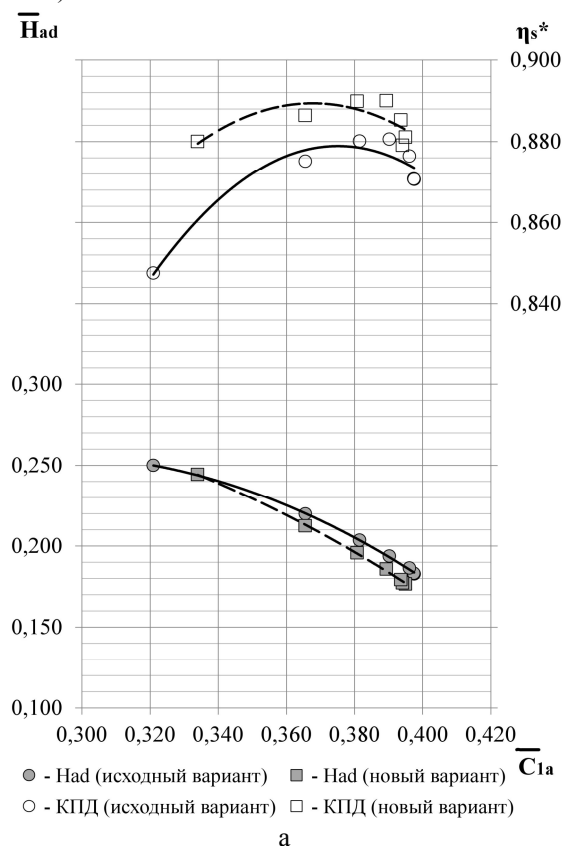


Рис. 7. Расчетные характеристики 1-й (а) и 2-й (б) ступеней

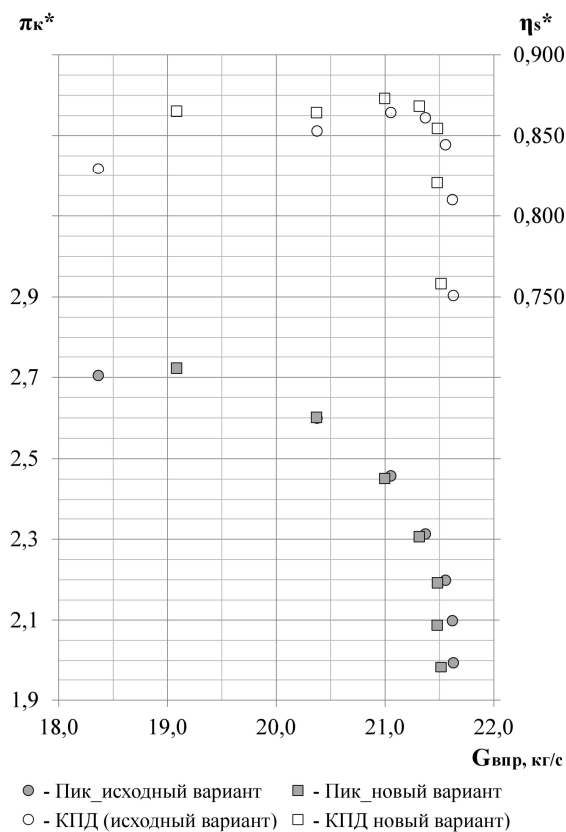


Рис. 8. Расчетные характеристики группы (1-3) ступеней

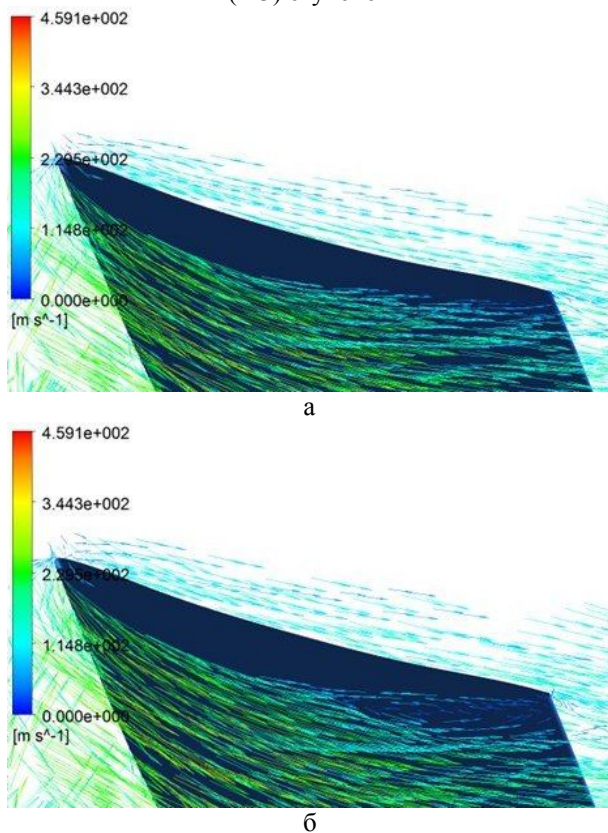


Рис. 9. Распределение векторов скорости в межлопаточном канале НА первой ступени в периферийной части профиля в оптимизированном (а) и исходном (б) варианте

Указанное повышение эффективности достигается как за счет снижения профильных, так и концевых потерь. Отличительной особенностью полученных профилей РК и НА является S-образность по выходной кромке, наряду с парусностью РК, навалом лопаток НА.

Результаты, выраженные в уменьшении отрывов потока в концевых сечениях НА, приведены на рис. 9, 10.

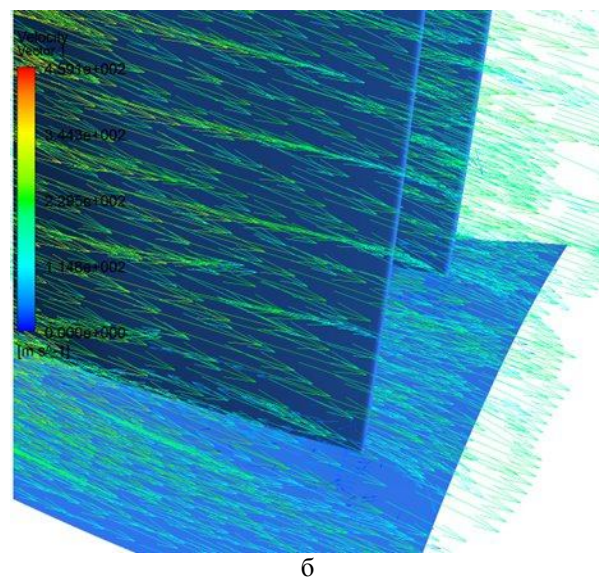
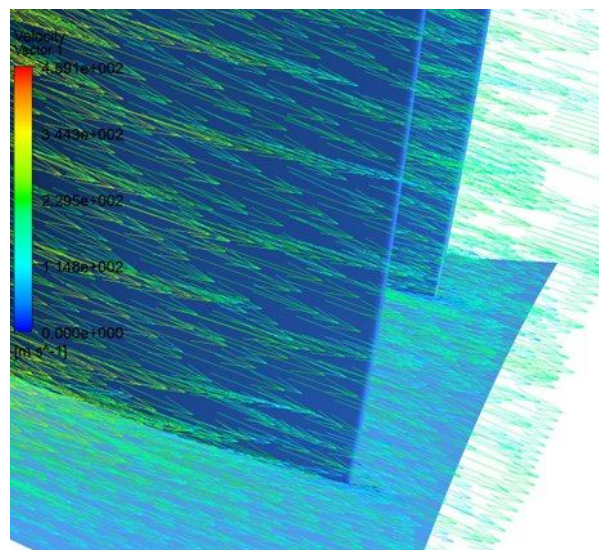


Рис. 10. Распределение векторов скорости в межлопаточном канале НА второй ступени во втулочной части профиля в оптимизированном (а) и исходном (б) варианте

Заключение

1. Разработан метод аэродинамического совершенствования лопаточных венцов ступени ком-

прессора на основе симплекс-метода прямой оптимизации, а также ЦКП и оптимизации по поверхности отклика, с использованием программного комплекса расчета трехмерного вязкого течения ANSYS CFX.

2. В результате экспериментальных исследований оптимизированной решетки профилей было установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления в ней уменьшился на (1,4...5,3)% в диапазоне углов атаки $\alpha = (-14)^\circ \div (6)^\circ$, по сравнению с исходной решеткой.

3. Впервые выполнено аэродинамическое совершенствование лопаточных венцов компрессора на основе ЦКП и оптимизации по поверхности отклика, для получения пространственной формы профиля пера лопатки с навалом и S-образностью по высоте, с учетом эффектов взаимного влияния РК и НА. Это позволило повысить изоэнтропический КПД группы первых трех ступеней компрессора стационарного ГТД на (0,9)%.

Литература

1. Двигатели 1944-2000: Авиационные, ракетные, морские, промышленные. Технико-экономическая база данных. Энциклопедия по двигателям [Текст] / Иллюстрированный справочник / под ред. И.Г. Шустова. – М.: АКС-Конверсалт, 2000. – 394 с.
2. Denton, J. The effects of lean and sweep on transonic fan performance [Text] / J. D. Denton, L. Xu // ASME paper GT2002-30327. – 10 p.
3. Biollo, R. Aerodynamic behaviour of a novel three-dimensional shaped transonic compressor rotor blade [Text] / R. Biollo, E. Benini // ASME paper GT2008-51397. – 12 p.
4. Гостелов, Дж. Аэродинамика решеток турбомашин [Текст]: пер. с англ. / Дж. Гостелов. – М.: Мир, 1987. – 385 с.
5. Effect of Leading-Edge Geometry on Separation Bubble on a Compressor Blade [Text] / H. Liu, B. Liu, L. Li, H. Jiang // ASME paper GT2003-38217. – 9 p.
6. Gbadebo, S. Influence of Surface Roughness on Three-Dimensional Separation in Axial Compressors [Text] / S. Gbadebo, T. Hynes, N. Cumpsty // ASME paper GT2004-53619. – 11 p.
7. Зангер. Использование методов оптимизации при проектировании компрессоров с управляемой локальной диффузорностью межлопаточных каналов [Текст] / Зангер // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1983. – Т.105. – №2. – С. 14-21.
8. Исследование компрессорных решеток с управляемой формой средней линии профиля [Текст] / В.С. Бекнев, С.Е. Василенко, М.Ю. Сорокалетов, Р.З. Тумашев, М.А. Шаровский // Теплоэнергетика. – 1997. – №4. – С. 38-42.
9. Иноуэ. Трёхмерная структура и затухание вихрей за осевой вращающейся решёткой лопаток [Текст] / Иноуэ, Куроумару // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1984. – Т.106, №3. – С. 21-29.
10. Еришов, С.В. Математическое моделирование трехмерных вязких течений в турбомашинах современный взгляд [Текст] / С.В. Еришов // Проблемы машиностроения. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 76-93.
11. Кампсти, Н. Аэродинамика компрессоров [Текст]: пер. с англ. / Н. Кампсти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
12. Шелковский, М.Ю. Верификация программного комплекса ANSYS CFX для численного анализа трехмерного вязкого течения в компрессоре [Текст] / М.Ю. Шелковский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/10 (57). – С. 60-65.
13. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст]: моногр. / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, С.В. Еришов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2002. – 356 с.
14. ANSYS CFX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx>. – 3.06.2013.
15. Комиссаров, Г.А. Методика газодинамического расчета осевого компрессора [Текст] / Г.А. Комиссаров, В.М. Микиртичан, М.В. Хайт. – М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова. – 1961. – 132 с.
16. Шелковский, М.Ю. Параметрическое исследование газодинамических характеристик компрессорных решеток [Текст] / М.Ю. Шелковский, // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 95–106.
17. Герасименко, В.П. Математические методы планирования испытаний воздушно-реактивных двигателей [Текст]: учеб. пособие / В.П. Герасименко. – Х.: ХАИ, 1982. – 105 с.
18. Расчет суммарных газодинамических характеристик компрессоров по идентифицированной модели с использованием CFD-технологий / В.Е. Спицын, М.А. Шаровский, А.В. Ивченко, Е.А. Токарева, М.Ю. Шелковский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/5 (40). – С. 37-41.
19. Расчетно-экспериментальное исследование осецентрибежного компрессора со специальным профилированием лопаточных венцов [Текст] / М.А. Шаровский, М.Ю. Шелковский, Е.А. Токарева, А.В. Ивченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №9 (76). – С. 34–40.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой В.Д. Борисенко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

МЕТОД АЕРОДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОПАТКОВИХ ВІНЦІВ КОМПРЕСОРА

М.Ю. Шелковський

У даній роботі розглянуто метод аеродинамічного вдосконалення лопаткових вінців компресора, на основі симплекс-методу прямої оптимізації, а також із використанням центрального композиційного планування та подальшої оптимізації по поверхні відгуку. Для розрахунків тривимірної в'язкої течії застосовується програмний комплекс ANSYS CFX. Розглянуто основні результати розрахунків характеристик різних компресорних решіток із оптимальним профілюванням лопаткових вінців. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленого методу.

Ключові слова: компресор, оптимізація, середня лінія, навал, характеристика, коефіцієнт втрат.

AERODYNAMIC OPTIMIZATION METHOD OF COMPRESSOR BLADE VANES

M. Yu. Shelkovsky

This paper presents a method of aerodynamic improving of compressor blade vanes, based on the simplex method of direct optimization, as well as using a central composite planning and further optimization of the response surface. For the calculation of three-dimensional viscous compressible flow software package ANSYS CFX was used. The main results of different characteristics calculations of compressor vanes with optimal profiling blade rows are considered. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the developed method.

Key words: compressor, optimization, middle line, lean, characteristic, loss coefficient.

Шелковский Михаил Юрьевич – инженер 1 категории сектора газодинамики отдела компрессоров ЦНИОКР ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.