

УДК 621.515

В.П. ГЕРАСИМЕНКО¹, М.Ю. ШЕЛКОВСКИЙ²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²«Заря»-«Машпроект» ГП НПКГ, Украина

КОМПЛЕКСНОЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПРЕССОРОВ ГТД

На основе использования программного комплекса ANSYS CFX и экспериментальных исследований выполнено аэродинамическое совершенствование компрессоров газотурбинных двигателей, обеспечившее повышение КПД компрессорных ступеней до $\eta_{ст}^ = 0,92...0,93$ путем трехмерного математического моделирования лопаточных венцов и применения специальных крыловых профилей с «управляемой» диффузорностью и S-образностью, тангенциальным «навалом» и «бочкообразностью» лопаток, оптимальными их геометрическими параметрами. Обращено внимание на необходимость учета смешения эффектов по источникам потерь при оптимизации решеток. Для учета нестационарного обтекания лопаточных венцов исследования выполнены в системе многоступенчатых компрессоров, что приближало условия обтекания к реальным. Сочетание расчетных и экспериментальных исследований обеспечило адекватность результатов и послужило основанием для их внедрения в новые изделия.*

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессор, лопаточный венец, трехмерное математическое моделирование

Введение

Современное авиадвигателестроение характеризуется высокими расчетными термодинамическими параметрами рабочего процесса газотурбинных двигателей (ГТД): $\pi_k^* = 35...45$, $T_{Г}^* = 1600...1800$ [1,2], для реализации которых с приемлемыми КПД компрессоров требуется повышение КПД их ступеней до значений $\eta_{ст}^* = 0,92...0,93$ [3] с одновременным повышением коэффициентов напора $\bar{H} = 0,27...0,35$.

Формулирование проблемы

Повышение КПД компрессорных ступеней возможно путем минимизации всех источников потерь, к которым, наряду с диффузорными, профильными и вторичными потерями, включают концевые и потери в радиальном зазоре, а также потери нестационарного обтекания лопаточных венцов из-за наличия следов за предыдущей решеткой. Кроме того, при около и сверхзвуковых скоростях потока на входе возникают волновые потери, требующие также минимизации.

Минимизация каждого из перечисленных видов потерь в отдельности часто затруднена наличием смешения между некоторыми из них. Так потери перетекания в радиальном зазоре [4] взаимосвязаны с потерями парного вихря и на трение о кольцевую ограничивающую стенку. А профильные потери зависят от нестационарности набегающего потока, вызван-

ной кромочными следами за предыдущими лопаточными венцами [5], тогда как включают в себя, кроме потерь на трение, кромочные потери на рассматриваемом лопаточном венце. Особенно сложным становится разграничение видов потерь при их минимизации путем многопараметрической оптимизации компрессорных лопаточных венцов на основе анализа трехмерного вязкого течения [6].

Целью данной статьи является повышение эффективности компрессоров газотурбинных двигателей путем их комплексного аэродинамического совершенствования.

Положительными параметрами оптимизации пространственной формы турбинных лопаток на основе 3D-моделирования являются публикации [7-9] наряду с многопараметрической многокритериальной комплексной оптимизацией [10] или поиском максимума КПД турбинной ступени симплекс-методом по семи переменным при расчете по среднему радиусу [11].

Возможности многопараметрической оптимизации решеток турбомашин подтверждены также комплексными исследованиями авторов [12] по традиционным геометрическим переменным: густоте решеток, относительной максимальной толщине профилей, радиусу входной кромки рабочих лопаток, относительному радиальному зазору с получением промежуточных регрессионных моделей на основе теории планирования эксперимента в частности греко-латинских квадратов. В данных исследо-

ваниях в качестве критерия оптимизации использован КПД ступеней. Задача оптимизации с использованием подобных математических моделей может быть решена явным и неявным способом с поиском оптимума одновременно по нескольким параметрам методами нелинейной оптимизации: крутого восхождения – скорейшего спуска, симплекс-методом, случайного поиска и др. [13,14]. Поиск экстремума в многомерном пространстве при безусловной оптимизации явным способом с помощью математической модели в виде произведений нелинейных функций по каждой переменной, получаемой по греко-латинскому квадрату, может быть сведен к простому получению системы уравнений с взятием частных производных по каждой переменной и приравнованием их к нулю без учета эффектов взаимодействия между переменными.

В случае условной оптимизации подобный метод позволяет учесть ограничения по каждому из факторов. Данные ограничения могут быть вызваны аэродинамическими, геометрическими, конструктивными или прочностными причинами, которые как правило взаимосвязаны между собой, а поэтому требуют учета взаимодействия факторов, что составляет определенную проблему.

Подобные исследования по оптимизации компрессорных лопаток путем пространственного моделирования также подтверждают положительные результаты [3,6]. Однако принципиальное отличие диффузорного характера течения в компрессорных лопаточных венцах по сравнению с конфузорным течением в турбинах, подтверждаемое исследованиями эффектов «управляемой» диффузорности [6,12,13], перетеканием в радиальном зазоре [4] с проявлением «скребкового» эффекта и эффекта противоположно движущейся торцевой стенки, а также волновых потерь при околокритическом обтекании профилей, и нестационарного взаимодействия соседних лопаточных венцов [5] дают основание предполагать о возможном существенном отличии проявления перечисленных эффектов на оптимальную форму компрессорных лопаток с участками «бочкообразности», «парусности», «саблевидности», S-«образности» и тангенциального «навала» [3,6].

Результаты исследования

Ввиду существенного смешения эффектов перечисленных факторов по большинству видов потерь в межлопаточных компрессорных каналах: профильных, кромочных и нестационарного взаимодействия; диффузорного отрыва в двухгранном углу, парного вихря и перетекания в радиальном зазоре, то важным предложением

остается выбор критерия аэродинамической оптимизации при 3D-моделировании [3,6-10].

Сложность учета и разделения перечисленных потерь на отдельные составляющие не позволяет их описывать традиционными регрессионными параметрическими зависимостями в расчетных методиках, что требует специальных приемов для их учета при современном проектировании компрессоров. В подобной ситуации представляется нецелесообразным разделять эффекты снижения КПД лопаточного венца или ступени по каждому источнику – типу потерь в отдельности. Оценку влияния смешиваемых эффектов на КПД ступени или лопаточного венца в анализе по видам потерь удобно выполнять интегрально, где в качестве такого интегрального критерия оптимизации использовать этот КПД. Например, влияние радиального зазора над рабочим колесом на потери вихря перетекания, парного вихря и трение на кольцевой ограничивающей стенке ввиду их смешения можно оценивать снижением КПД ступени в функции от величины относительного радиального зазора [4]. Для ослабления вихря перетекания и снижения потерь перетекания согласно структурному анализу завихренностей за вращающейся решеткой предложено применять профили лопаток в периферийном сечении с обратной S-образностью в сочетании с парусностью лопаток.

Эффективным средством снижения профильных потерь в компрессорных решетках и лопаточных венцах с повышенной аэродинамической нагрузкой является применение крыловых профилей с «управляемой» диффузорностью [15,17]. Параметрическая оптимизация таких лопаточных венцов на основе 3D-моделирования позволила повысить КПД ступени на 1,6% до 0,92 [6].

При околокритическом обтекании лопаток происходит смешение эффектов волновых потерь с потерями отрыва на диффузорном участке спинки лопатки из-за влияния звукового скачка на отрыв, что необходимо учитывать особенно при «управлении» диффузорностью [6].

Учет влияния нестационарности потока, связанной с обтеканием лопаточных венцов периодически неравномерным потоком из-за следов за лопатками предыдущей решетки, на характеристики компрессорной ступени [5] осуществлен путем выполнения трехмерных аэродинамических расчетов в системе многоступенчатого компрессора [3], что позволило приблизить расчетные условия обтекания решеток профилей к реальным. Такие трехмерные расчеты компрессоров в отличие от расчетов по среднему радиусу [11] или двумерных [17], в том числе по поверхностям S1 и S2 методом

Ву наиболее полно учитывают трехмерную реальную структуру течения в межлопаточных каналах [18], что позволяет оптимизировать пространственную форму лопаток рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА) компрессорных ступеней в многоступенчатом компрессоре [3, 6, 16].

Заключение

Изложен комплексный подход к аэродинамическому совершенствованию лопаточных венцов многоступенчатых осевых компрессоров ГТД путем учета и снижения всех видов потерь: профильных, перетекания в радиальном зазоре, нестационарного обтекания и др. на основе трехмерного математического моделирования лопаток при их оптимизации с применением «управляемой» диффузорности, S-образных и специальных крыловых профилей, тангенциального «навала» и «бочкообразности» лопаток и т.п. Одной из особенностей проведенных исследований по многопараметрической оптимизации лопаточных венцов был учет смещения эффектов по разным источникам потерь путем использования КПД как интегрального критерия оптимизации. Такие мероприятия позволили получить КПД высоконапорных компрессорных ступеней $\eta_{ст}^* = 0,92...0,93$ [3], который использован в качестве интегрального критерия оптимизации. При этом комплексность предусматривает такую оптимизацию одновременно по всем варьируемым геометрическим переменным, например симплекс-методом, среди которых коэффициент напора, как параметр аэродинамической нагрузки может быть вторым критерием оптимизации или как переменная – ограничением.

Литература

1. Герасименко В.П. Теорія авіаційних двигунів [Текст]: підручник / В.П. Герасименко. – Х.: ХАІ, 2003. – 199 с.
2. Научный вклад в создание авиационных двигателей [Текст] / Под общей ред. В.А. Скибина и В.И. Солониной М.: Машиностроение 2000. Кн.1 – 725 с., Кн.2 – 646 с.
3. Герасименко В.П. Расчетно-экспериментальное исследование газодинамических характеристик компрессорных решеток в системе многоступенчатого компрессора [Текст] / В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология -2012.- №8 (95) – С. 61-68.
4. Герасименко В.П. Эффекты радиального зазора в турбомашинных [Текст] / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004.- №8 (16).- С.51-58.

5. Герасименко В.П. Исследование влияния нестационарности потока на характеристики ступени осевого компрессора [Текст] / В.П. Герасименко, А.В. Приходько // Газовая динамика двигателей и их элементов: сб. науч. тр. – Х.: – 1989.- Вып.1.- С.102-107.
6. Герасименко В.П. Аэродинамическая оптимизация рабочего колеса компрессора ГТД [Текст] / В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №10(77). – С.46-48.
7. Ершов С.В. Аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопаток паровых и газовых турбин [Текст] / С.В. Ершов, В.А. Яковлев // Авиационно-космическая техника и технология. 2008-№7(54) – С.66-70.
8. Lampart P. Direct Constrained Computational Fluid Dynamics Based Optimization of Three - Dimensional Blading for the Exit Stage of a Large Power Steam Turbine [Text] / P. Lampart, S. Yershov // Trans. of the ASME. Journal of Engineering for Power. -2003. Vol.125, №1, – P.385-390.
9. Ершов С.В. Многорежимная аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопаточных аппаратов турбин [Текст] / С.В. Ершов, В.А. Яковлев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №9(76). – С.29-33.
10. Усатий О.П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.16 «Турбомашини та турбоустановки» - Харків. 2013-25с.
11. Герасименко В.П. Оптимизация параметров малоразмерных агрегатов турбонаддува ДВС [Текст] / В.П. Герасименко, Н.К. Рязанцев, Б.С. Сотников // Прогресс, технология, качество: сб. науч. тр. Второго конгресса двигателестроителей Украины – Харьков. 1997.-С.153-154.
12. Герасименко В.П. Оптимизация геометрических параметров лопаток турбомашин решением прямой аэродинамической задачи [Текст] / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // Наукові праці. сер.: Техногенна безпека. Науково-методич. журнал. Миколаїв. держ. гуманіт. ун-т ім. П. Могили Комплексу «Києво-Могилянської академії» -2006.-Т.53.-Вип 40.-С.133-140.
13. Бойко А.В. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбомашин [Текст] : учеб. пособие

/ А.В.Бойко Ю.Н.Говорушенко.— Х.: Вища школа, 1989.— 217с.
 14.Химмельблау Д.Прикладное нелинейное программирование [Текст]: пер. с англ. / Д.Химмельблау — М.: Мир, 1975.— 535с.
 15. Спицын В.Е. Компрессор со специальным профилированием лопаточных венцов [Текст] / В.Е.Спицын, М.А.Шаровский, М.Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — №7(54).- С.90-94.
 16.Шаровский М.А. Характеристики многоступенчатого компрессора со специальным

профилированием лопаточных венцов [Текст] / М.А. Шаровский, Е.А. Токарева, М.Ю. Шелковский // Вестник двигателестроения.- 2007.- №3.- С.56-61.

17.Кваша Ю.А. О совместном решении прямой и обратной задачи газодинамики компрессорных решеток [Текст] / Ю.А.Кваша, С.В.Мелашич. // Авиационно-космическая техника и технология -2008.- №7(54).-С.74-77.
 18.Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров [Текст]: пер.с англ./ Н.Кампсти — М.: Мир, 2000.-688с.

Поступила в редакцию 25.05.2013

В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский. Комплексне аеродинамічне вдосконалення компресорів ГТД

На основі використання програмного комплексу ANSYS CFX і експериментальних досліджень виконано аеродинамічне вдосконалення компресорів газотурбінних двигунів, яке забезпечило підвищення ККД компресорних ступенів до $\eta_{ст}^ = 0,92...0,93$ шляхом тривимірного математичного моделювання лопаткових вінців і застосування спеціальних крилових профілів із «керованою» дифузорністю і S-образністю, тангенціальним «навалом» і «бочкоподібності» лопаток, оптимальними їх геометричними параметрами. Звернуто увагу на необхідність врахування змішання ефектів за джерелами втрат при оптимізації ґраток. Для обліку нестационарного обтікання лопаткових вінців дослідження виконані в системі багатоступеневих компресорів, що наближало умови обтікання до реальних. Поєднання розрахункових та експериментальних досліджень забезпечило адекватність результатів і послужило підставою для їх впровадження в нові вироби.*

Ключові слова: газотурбінний двигун, компресор, лопатковий вінець, тривимірне математичне моделювання.

V.P. Gerasimenko, M.Y. Shelkovsky. Complex aerodynamic perfection of compressors of GTE

The aerodynamic perfection of compressors of gas turbine engines was done using experimental researches and software package ANSYS CFX. That provides an increase of compressor stages efficiency to $\eta_{st}^ = 0,92...0,93$ by the three-dimensional mathematical design of blade vanes and application of the special profiles with «controlled» diffusion and S-profiles, by a tangential «lean» and «barrel-shaped» blades, their optimum geometrical parameters. Paid regard to necessity account of mixing of effects on the sources of losses during optimization of blade rows. For the account of the transitional flow in blade vanes the researches were performed in the multi-stage compressors system, that approached the flow conditions to the real. Combination of calculation and experimental researches provided adequacy of results and served foundation for their introduction in new wares.*

Key words: gas turbine engine, compressor, blade row, three-dimensional mathematical modeling.