УДК 621.165:532.6

В.А. ЯКОВЛЕВ, С.В. ЕРШОВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАТОЧНЫХ АППАРАТОВ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Описан подход к аэродинамической оптимизации ступеней паровых и газовых турбин на основе использования трехмерных моделей расчета вязкого течения в лопаточных аппаратах. Оптимизационные процедуры включают в себя прямые методы локального поиска, эвристические методы глобального поиска, а также их гибридизацию. Представлены результаты оптимизационных исследований двухступенчатой газовой турбины. В результате оптимизации турбинных ступеней улучшилось качество обтекания лопаточных аппаратов за счет уменьшения интенсивности вторичных течений, уменьшились потери кинетической энергии, повысился КПД турбины.

Ключевые слова: турбина, лопаточный аппарат, пространственное профилирование, вычислительная аэродинамика, трехмерное вязкое течение, оптимизация.

Введение

Одним из перспективных направлений по обеспечению высоких характеристик проектируемых (или модернизируемых) турбин является использование пространственного профилирования лопаточных аппаратов и проточной части турбины в целом. Реализовать это можно путем привлечения современных методов вычислительной аэродинамики (CFD) для расчета потока в лопаточных аппаратах турбомашин и применения эффективных методов решения задач оптимизации [1–4].

В данной работе представлен подход к аэродинамической оптимизации лопаточных аппаратов турбин на основе использования трехмерных моделей расчета вязкого течения, а также приведены результаты выполненных оптимизационных исследований для двухступенчатой газовой турбины.

1. Постановка задачи и методы расчета

Главной задачей проведения данных исследования является аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов проточных частей турбомашин. В основу решения этой задачи положены следующие методологические принципы:

использование 3D моделей расчета течения;

 применение эффективных математических методов оптимизации;

использование прототипов конструкций;

 выбор относительно небольшого набора параметров, изменение которых позволяет управлять пространственной формой лопатки (при этом геометрическая форма профилей лопаток в заданных сечениях остается неизменной).

Задача оптимизации пространственной формы лопаток проточной части турбины, состоящей из одной или нескольких ступеней, формулируется следующим образом: найти экстремум функции цели при ограничениях, накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры. Изменение пространственной формы лопаток осуществляется за счет согласованного варьирования их геометрических параметров. При этом выбираются не абсолютные значения параметров, а относительные отклонения от исходной конструкции. Принимается, что эти отклонения либо постоянные вдоль пера лопатки, либо распределены по линейному или квадратичному закону. Условие постоянства режима течения обеспечивается путем введения ограничения на изменение расхода рабочего тела. В качестве инструментария для решения задачи пространственного профилирования используется разработанный в ИПМаш программный комплекс Optimus-2. Он представляет собой интегрированную среду для проведения оптимизационных исследований и включает в себя математические методы локальной оптимизации (метод деформированного многогранника Нелдера-Мида [5], метод Торкзон [6]), глобальной оптимизации (генетический алгоритм [7]), а также методы, основанные на идеях гибридизации (комбинация генетического алгоритма и прямых методов локального поиска).

Расчеты трехмерного течения выполняются с помощью CFD солвера FlowER [8], в котором реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST k-ω Ментера [9]. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазимонотонной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

2. Анализ исходной конструкции

В качестве объекта исследования рассмотрена проточная часть газовой турбины, являющейся частью газотурбинного двигателя. Она состоит из одноступенчатой турбины компрессора (турбина высокого давления (ТВД)), одноступенчатой свободной силовой турбины (турбина низкого давления (ТНД)) и конструктивно расположенных между ними силовых стоек (рис. 1, 2). Геометрические и газодинамические характеристики ступеней турбины (как исходной конструкции, так и после оптимизации) даны в табл. 1, 2.

Для анализа исходной конструкции выполнен расчет трехмерного вязкого течения во всей проточной части турбины на достаточно мелкой сетке (сетке третьего уровня разбиения), с общим числом ячеек 2774016. Полученные значения выходных параметров (реактивности, эффективного угла выхода), а также КПД по ТВД и ТНД, приведены табл. 1, 2. В целом адиабатический КПД всей турбины исходной конструкции составил 0,8354. Анализ течения показал, что в межлопаточных каналах рабочих колес как ТВД так и ТНД наблюдаются вторичные течения - в РК ТВД ближе к периферии, а в РК ТНД в области 0,1÷0,5 высоты лопатки. Более интенсивные вторичные течения в РК ТНД (рис. 3 ,a, 4, a). В результате в этой зоне РК формируются более значительные потери кинетической энергии (рис. 5).

По-видимому, это связано с резким раскрытием проточной части по втулке перед РК в меридиональной плоскости (рис. 2), а также неоднородностью поля параметров по высоте лопатки. Кроме того, данная конструкция характеризуется достаточно большим значением угла выхода потока из РК ТНД (рис. 6). Среднее значение абсолютного тангенциального угла выхода равно –31,43 градуса. Неосевое направление выхода потока из РК ТНД приводит к дополнительным потерям.



Рис. 1. Общий вид проточной части газовой турбины



Рис. 2. Меридиональное сечение проточной части НА – направляющий аппарат; РК – рабочее колесо; С – стойка

Таблица 1

	Конструкция ТВД							
Параметр	Исходная		Оптимизация 1		Оптимизация 2			
	Статор	Ротор	Статор	Ротор	Статор	Ротор		
Корневой угол установки, град	32,67	74,26	31,77	75,79	32,59	73,56		
Крутка лопатки, град	0,0	25,89	0,12	26,84	-0,64	33,79		
Относительная длина лопатки, l/b *	0,44	0,79	0,44	0,85	0,44	0,85		
Относительный шаг решетки, t/b *	0,72	0,73	0,72	0,73	0,72	0,73		
Веерность решетки, D _{ср} /l	10,63	10,19	10,60	9,47	10,60	9,46		
Количество лопаток, z	19	34	19	34	19	34		
Угол выхода, α _{1эф} , β _{2эф} , град *	17,26	25,64	18,02	24,00	17,61	22,97		
Реактивность, ρ	0,346		0,438		0,484			
Расход, G, кг/с	1,309		1,361		1,326			
Адиабатический КПД, _{Пад}	0,779		0,7794		0,7739			

Геометрические и газодинамические характеристики ТВД газотурбинного двигателя

* по среднему сечению

···· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· r	· · · · ·						
		Конструкция ТНД							
Параметр	Исхо	Исходная		Оптимизация 1		Оптимизация 2			
	Статор	Ротор	Статор	Ротор	Статор	Ротор			
Корневой угол установки, град	31,4	75,52	31,4	69,52	31,4	75,52			
Крутка лопатки, град	0,78	-38,08	0,78	-38,61	0,78	-49,18			
Относительная длина лопатки, l/b *	0,81	1,97	0,81	1,97	0,81	1,97			
Относительный шаг решетки, t/b *	0,72	0,78	0,72	0,78	0,72	0,78			
Веерность решетки, D _{cp} /l	6,52	5,59	6,52	5,60	6,52	5,59			
Количество лопаток, z	23	44	23	44	23	44			
Угол выхода, α _{1эф} , β _{2эф} , град *	18,91	26,94	18,91	21,64	18,91	22,02			
Реактивность, р	0,2	0,275		0,463		0,448			
Расход, G, кг/с	1,3	1,302		1,353		1,315			
Алиабатический КПЛ. nag	0.7	0.7877		0.8399		0.83			

Геометрические и газодинамические характеристики ТНД газотурбинного двигателя

* по среднему сечению

В результате проведенного анализа сформированы направления улучшения данной конструкции:

 аэродинамическая оптимизация проточной части за счет изменения углов установки и крутки лопаток;

 применение пространственного профилировании лопаточных венцов направляющих аппаратов.



Рис. 3. Линии тока в прикорневой области межлопаточного канала рабочего колеса ТНД. Вид со стороны давления: а – исходная конструкция; б – модифицированная конструкция (оптимизация 2)



Таблина 2

Рис. 4. Линии тока в прикорневой области межлопаточного канала рабочего колеса ТНД. Вид со стороны разрежения: а – исходная конструкция; б – модифицированная конструкция (оптимизация 2)

3. Оптимизация ступеней газовой турбины

Для решения поставленных задач проведен ряд оптимизационных исследований. Во всех исследованиях в качестве функции цели выбирался адиабатический КПД всей турбины. Расчеты течения в процессе оптимизации выполнялись на сетках первого (45360 ячеек) и второго (346752 ячеек) уровней разбиения. Уточнение результата проводилась путем пересчета полученной в процессе оптимизации проточной части на сетке третьего уровня (2774016 ячеек). Особенностью данных исследований является оптимизация всей проточной части турбины (ТВД+стойки+ТНД).



Рис. 5. Потери кинетической в РК ТНД: а – без учета потерь с выходной скоростью; б – с учетом потерь с выходной скоростью; — – исходная конструкция; – - - оптимизация 1; – - - оптимизация 2

Первое исследование (оптимизация 1) выполнялось с помощью метода Нелдера-Мида на грубой сетке первого уровня сеточного разбиения. Оптимизация проводилась по шести параметрам:

угол установки лопатки (корневого сечения)
для направляющих и рабочих лопаток ТВД и рабочих лопаток ТНД;

- крутка лопатки (угол поворота каждого се-

чения относительно корневого в плоскости сечения) для направляющих и рабочих лопаток ТВД и рабочих лопаток ТНД.





Изменение угла, характеризующего крутку лопатки, осуществлялось по линейному закону по высоте лопатки.

Помимо прямых ограничений на параметры накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне $\pm 5 \% (\pm 0,065 \text{ кг/c})$ от исходного, что обеспечивало постоянство режима течения.

Значения проектных параметров до и после оптимизации приведены в таблицах 1, 2. Наиболее существенно изменились параметры угла установки лопатки РК ТВД (на 1,53°) и угла установки лопатки РК ТНД (на $-6,0^{\circ}$). Значение функции цели (КПД) достигло 0,8564 (увеличение на 0,021). Для РК ТНД потери кинетической энергии уменьшились по всей высоте лопатки (рис. 5). Абсолютный тангенциальный угол выхода потока из РК ТНД существенно уменьшился. Его среднее значение по высоте лопатки стало $+5,1^{\circ}$ (рис. 6).

Следующее исследование (оптимизация 2) выполнялась с помощью гибридного метода, построенного на базе последовательного подхода [10]. Множество параметров оптимизации такое же, как и в предыдущем исследовании. На первом этапе с помощью генетического алгоритма приближенно определялся глобальный экстремум целевой функции. Так как реализация генетического алгоритма требует большого количества вычислений функции цели, то на этом этапе солвер FlowER работал с достаточно грубой сеткой (первого уровня разбиения). На втором этапе значение оптимума уточнялось методом Нелдера-Мида. Этот этап выполнялся с использованием сетки второго уровня. В данном исследовании более всего изменились параметры крутки лопатки РК ТВД (на 7,9°) и крутки лопатки РК ТНД (на –11,1°). Значение функции цели (общий КПД турбины) достигло 0,8517 (увеличение на 0,0163). Для РК ТНД потери кинетической энергии с учетом потерь с выходной скоростью в целом уменьшились по высоте лопатки (рис. 5), за исключением прикорневой области, где наблюдается небольшой рост потерь. Среднее значение абсолютного тангенциального угла выхода потока из РК ТНД $\overline{\beta}_c = 0,23^\circ$ (рис. 6).

Таким образом, направление выхода потока из ТНД стало ближе к осевому. Качество обтекания лопаток РК в ступени ТНД несколько улучшилось за счет уменьшения интенсивности вторичных течений у корня (рис. 3 б, 4 б) и радиальных перетеканий в зазоре.

Необходимо отметить, что в проведенных исследованиях (оптимизация 1 и 2), были получены различные оптимальные решения. Это объясняется, во-первых, наличием более одного экстремума в области определения функции цели, и, во-вторых, использованием различных стратегий оптимизации в исследованиях (разный уровень численной модели, определяемый уровнем сеточного разбиения, разные методы оптимизации). Более высокий КПД турбины в варианте 1 получен за счет увеличения расхода через проточную часть при том же теплоперепаде (см. табл. 1, 2). При этом значение расхода в варианте 1 достаточно близко к границе допустимой области по ограничениям.

В результате в качестве лучшего варианта был выбран вариант 2.

Помимо описанных исследований проведены исследования по пространственному профилированию лопаток НА как ТВД, так и ТНД с параметрами, характеризующими саблевидную форму лопаток. Однако положительных результатов эта группа исследований не дала. Длина лопаток НА ТВД достаточно мала и изменение параметров саблевидности в данном случае не приводит к улучшению функции цели. Пространственное профилирование лопаток НА ТНД, в связи с малым зазором между стойками и НА, ухудшало обтекание стоек с образованием интенсивных вихрей.

Заключение

Предложен подход к аэродинамической оптимизации пространственной формы лопаток турбин на основе трехмерных моделей расчета течения. С использованием 3D моделей расчета течения выполнен ряд оптимизационных исследований двухступенчатой турбины газотурбинного двигателя. В результате оптимизации турбинных ступеней улучшилось качество обтекания лопаточных аппаратов за счет уменьшения интенсивности вторичных течений, направление потока на выходе из РК ТНД стало близким к осевому направлению, уменьшились потери кинетической энергии, повысился КПД турбины.

Литература

1. Torre A. Latest Developments and Perspectives in the Optimised Design of LP Steam Turbines at ANSALDO / A. Torre, S. Cecchi // 7th European Conference on Turbomashinary Fluid Dynamics and Thermodynamics, Athens, Greece – 2007. – P. 19-40.

2. Demeulenaere A. Three-dimensional inverse method for turbomachinery blading design / A. Demeulenaere, R.V. Braembussche // Computational Fluid Dynamics '96:, Proceedings, 3rd ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conf., J.-A.Desideri et al., eds, John Willey & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England. – 1996. – P. 965-971.

3. Lampart P. Direct Constrained Computational Fluid Dynamics Based Optimization of Three-Dimensional Blading for the Exit Stage of a Large Power Steam Turbine / P. Lampart, S. Yershov // Transactions of the ASME. Journal Engineering for Gas Turbines and Power. – 2003. – 125, No 1. – P. 385-390.

4. Бойко А.В. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, С.В. Ершов, А.В. Русанов, С.Д Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.

5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование; пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 535 с.

6. Torczon V.J. Multi-Directional Search: A Direct Search Algorithm for Parallel Machines / V.J. Torczon // A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements f or the Degree Doctor of Philosophy Approved, Rice University, Houston, Texas, 2004. – 114 p.

7. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989. – 408 p.

8. Єршов С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER»: свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77; 19.02.96 / С.В. Єршов, А.В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 1996. – 1 с.

9. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // $AIAA J. - 1994. - V. 32, N \ge 8. - P. 1598-1605.$

10. Haupt R.L. Practical genetic algorithms / R.L. Haupt, S.E. Haupt. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 253 p.

Поступила в редакцию 2.06.2009

Рецензент: член-корр. НАН Украины, зав. отделом А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОПАТКОВИХ АПАРАТІВ ДВОСТУПІНЧАТОЇ ГАЗОВОЇ ТУРБІНИ В.А. Яковлєв, С.В. Єршов

Описано підхід до аеродинамічної оптимізації ступенів парових та газових турбін на основі використання тривимірних моделей розрахунку в'язкої течії в лопаткових апаратах. Оптимізаційні процедури містять у собі прямі методи локального пошуку, евристичні методи глобального пошуку, а також їхню гібридизацію. Представлено результати оптимізаційних досліджень двоступінчатої газової турбіни. В результаті оптимізації турбінних ступенів поліпшилась якість обтікання за рахунок зменшення інтенсивності вторинних течій, зменшилися втрати кінетичної енергії, підвищився ККД турбіни.

Ключові слова: турбіна, лопатковий апарат, просторове профілювання, обчислювальна аеродинаміка, тривимірна в'язка течія, оптимізація

OPTIMISATION OF TWO-STAGE GAS TURBINE BLADING

V.A. Yakovlev, S.V. Yershov

The method based on the 3D viscous flow solver for aerodynamic optimisation of the stages of steam and gas turbines is described. The optimisation technique involves direct local search methods, heuristic global search methods and their hybridisation. Numerical results of optimisation investigations are presented for two-stage gas turbine. The results obtained show improving flow behaviour due to diminishing intensity of the secondary flows, decreasing kinetic energy losses and increasing turbine efficiency.

Key words: turbine, blade row, spatial blade design, computational fluid dynamic, three-dimensional viscous flow, optimisation

Яковлев Виктор Андреевич – научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: yava@ipmach.kharkov.ua.

Ершов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua.