

УДК 621.165 : 532.6

В.А. ЯКОВЛЕВ, С.В. ЕРШОВ, д-р техн. наук

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков, Украина, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua, yava@ipmach.kharkov.ua*

ОПТИМИЗАЦИЯ СТУПЕНЕЙ ГАЗОВЫХ ТУРБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ

Описано підхід до аеродинамічної оптимізації просторової форми лопаток турбін на основі використання тривимірних моделей розрахунку в'язкої течії в лопаткових апаратах турбін. Оптимізаційні процедури містять у собі прямі методи локального пошуку, евристичні методи глобального пошуку, а також їхню гібридизацію. Представлено результати оптимізаційних досліджень газової турбіни. Отримані результати дозволяють поліпшити якість обтікання, зменшити втрати, підвищити ККД турбіни.

The approach of aerodynamic optimisation of a turbine blade 3D shape using the 3D flow computation model is described. The optimisation technique consists in direct methods of a local search and heuristic ones of a global search as well as their hybridisation. Results of the optimisation studies are presented for the gas turbine flowpath. The computational results demonstrate improved flow behaviour, reduced kinetic energy losses and increased turbine efficiency.

Введение

Одним из перспективных направлений по обеспечению более 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 математических 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.

Постановка задачи и методы расчета

Задача оптимизации пространственной формы лопаток проточной части турбины, состоящей из одной или нескольких ступеней, формулируется следующим образом: найти максимум КПД турбины при ограничениях накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры. Изменение пространственной формы лопаток осуществляется за счет согласованного варьирования геометрических параметров плоских сечений, которыми задана лопатка. При этом выбираются не абсолютные значения параметров, а их относительные отклонения от исходной (базовой) конструкции. Для уменьшения количества варьируемых параметров 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 как локальной (метод деформированного многогранника Нелдера-Мида [5], метод Торкзон [6]), так и глобальной оптимизации (генетический алгоритм [7]). Кроме того, реализован последовательный гибридный метод оптимизации, представляющий собой комбинацию генетического алгоритма и метода Нелдера-Мида.

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 [9]. Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST Ментера [10]. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазилинейной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

Анализ исходной конструкции

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

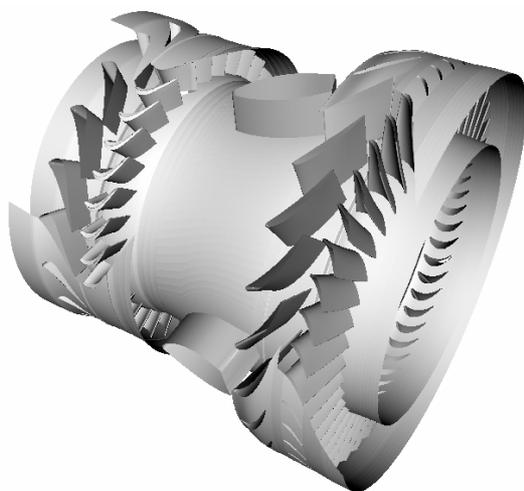
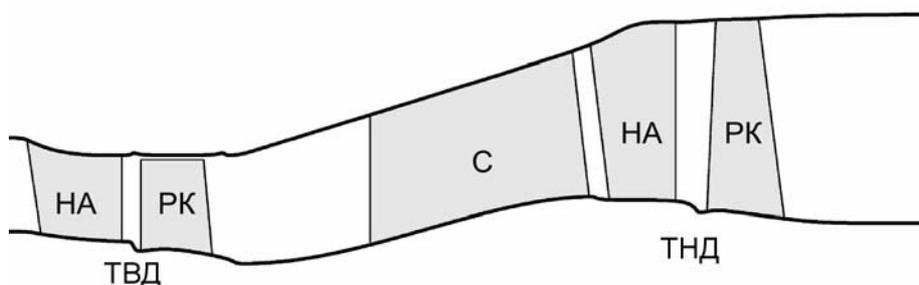


Рис. 1. Общий вид проточной части газовой турбины



НА – направляющий аппарат; РК – рабочее колесо; С – стойка

Рис. 2. Меридиональное сечение проточной части

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 в таблицах 1, 2. В целом адиабатический КПД всей турбины исходной конструкции составил 83,54 %.

Таблица 1. Геометрические и газодинамические характеристики ТВД газотурбинного двигателя

Параметр	Конструкция ТВД					
	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_{cp}/l	10,63	10,19	10,60	9,47	10,60	9,46
Количество лопаток, z	19	34	19	34	19	34
Угол выхода, $\alpha_{1эф}, \beta_{2эф}$, 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, $\eta_{ад}$, %	77,90		77,94		77,39	

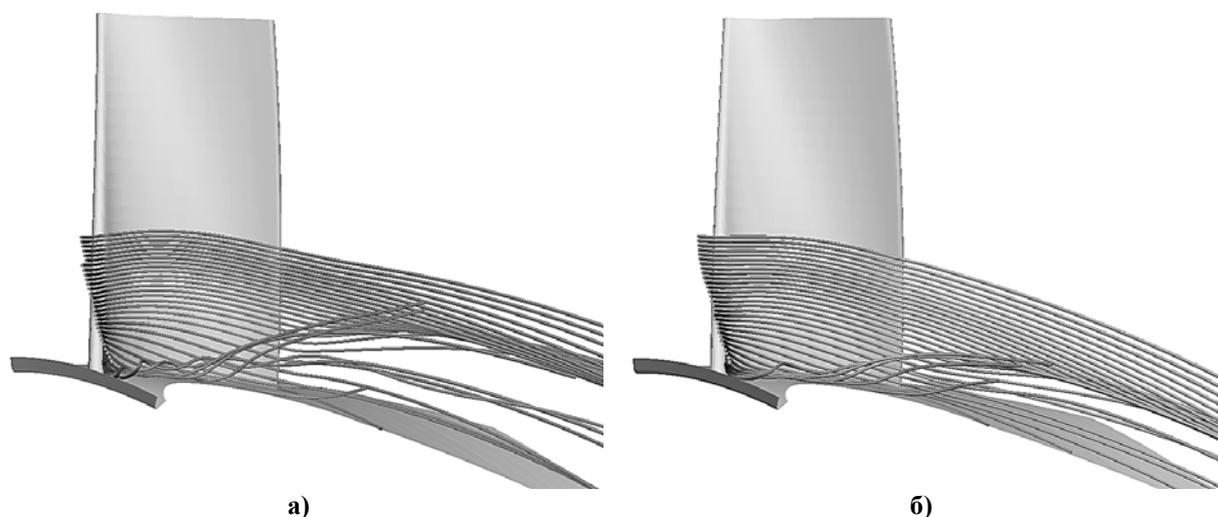
* по среднему сечению

Таблица 2. Геометрические и газодинамические характеристики ТНД газотурбинного двигателя

Параметр	Конструкция ТНД					
	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, $\alpha_{1эф}, \beta_{2эф}$, град*	18,91	26,94	18,91	21,64	18,91	22,02
Реактивность, ρ	0,275		0,463		0,448	
Расход, G , кг/с	1,302		1,353		1,315	
Адиабатический КПД, $\eta_{ад}$, %	78,77		83,99		83,00	

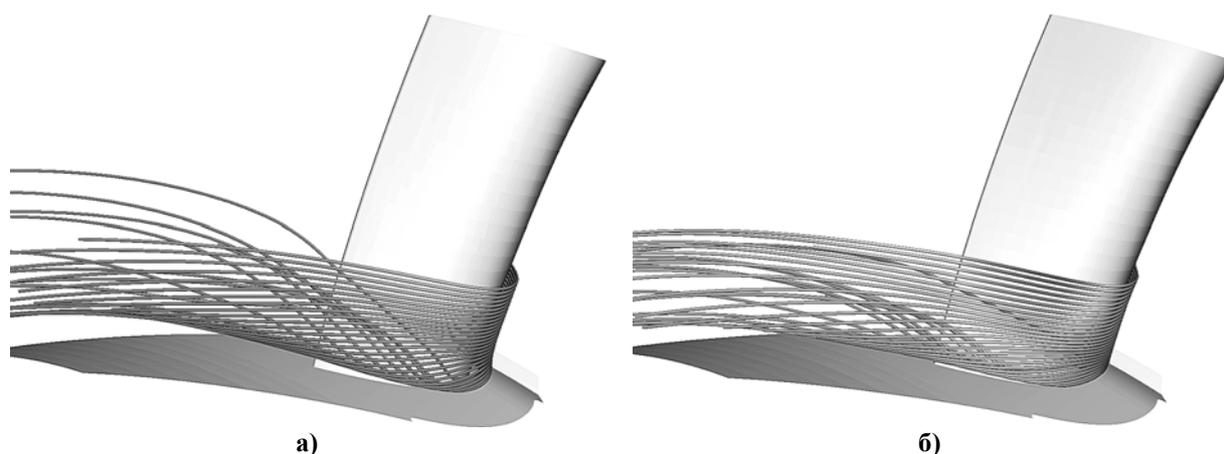
* по среднему сечению

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. 3а, 4а). В результате в этой зоне рабочей лопатки формируются более значительные потери кинетической энергии (рис. 5). По-видимому, это связано с резким раскрытием проточной части по втулке перед РК в меридиональной плоскости (см. 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.



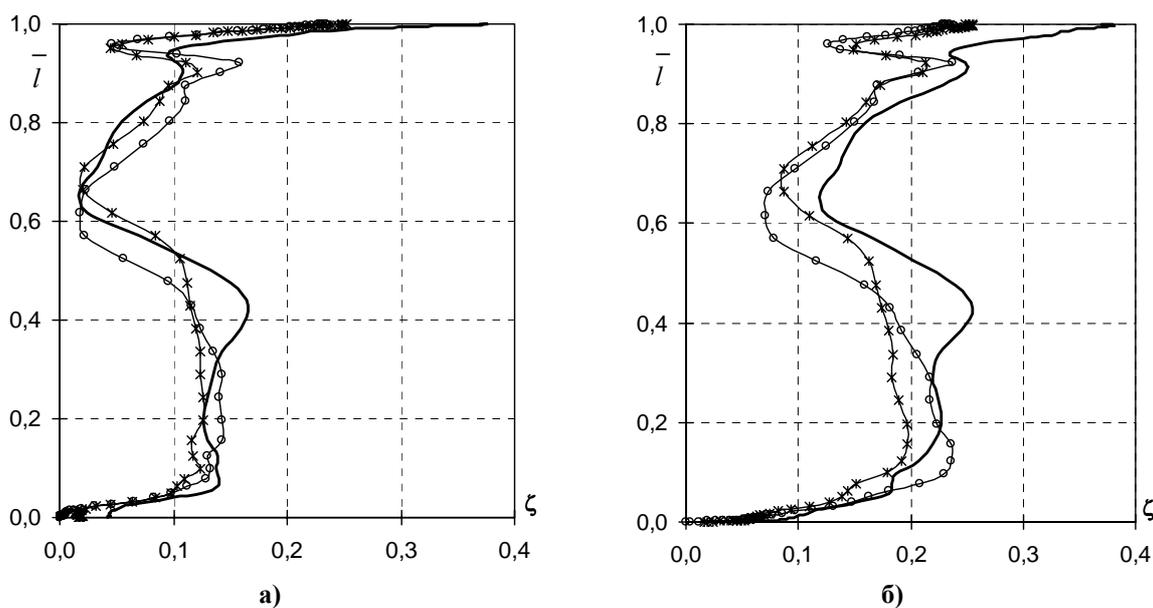
а – исходная конструкция; б – модифицированная конструкция (оптимизация 2)

Рис. 3. Линии тока в прикорневой области межлопаточного канала рабочего колеса ТНД. Вид со стороны давления



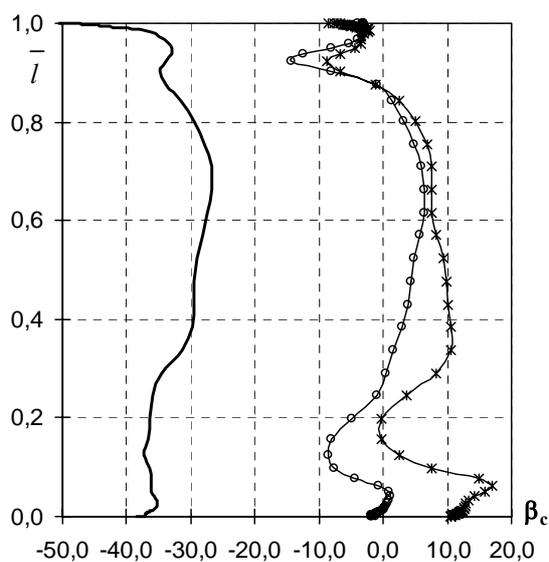
а – исходная конструкция; б – модифицированная конструкция (оптимизация 2)

Рис. 4. Линии тока в прикорневой области межлопаточного канала рабочего колеса ТНД. Вид со стороны разрежения



— — исходная конструкция; * — * — оптимизация 1; o — o — оптимизация 2
 а — без учета потерь с выходной скоростью; б — с учетом потерь с выходной скоростью

Рис. 5. Потери кинетической энергии в РК ТНД



— — исходная конструкция; * — * — оптимизация 1; o — o — оптимизация 2

Рис. 6. Абсолютный тангенциальный угол выхода из РК ТНД

В результате проведенного анализа были сформированы направления улучшения данной конструкции:

- аэродинамическая оптимизация проточной части за счет изменения углов установки и крютки лопаток;
- применение пространственного профилирования лопаточных венцов направляющих аппаратов.

Оптимизация ступеней газовой турбины

Для решения поставленных задач было проведено ряд оптимизационных исследований. Во всех исследованиях в качестве функции цели выбирался адиабатический КПД всей турбины. Расчеты течения (для определения функции цели) в процессе оптимизации выполнялись на сетках первого (45360 ячеек) и второго (346752 ячеек) уровней разбиения. Проверка полученного 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).

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 сечения 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.

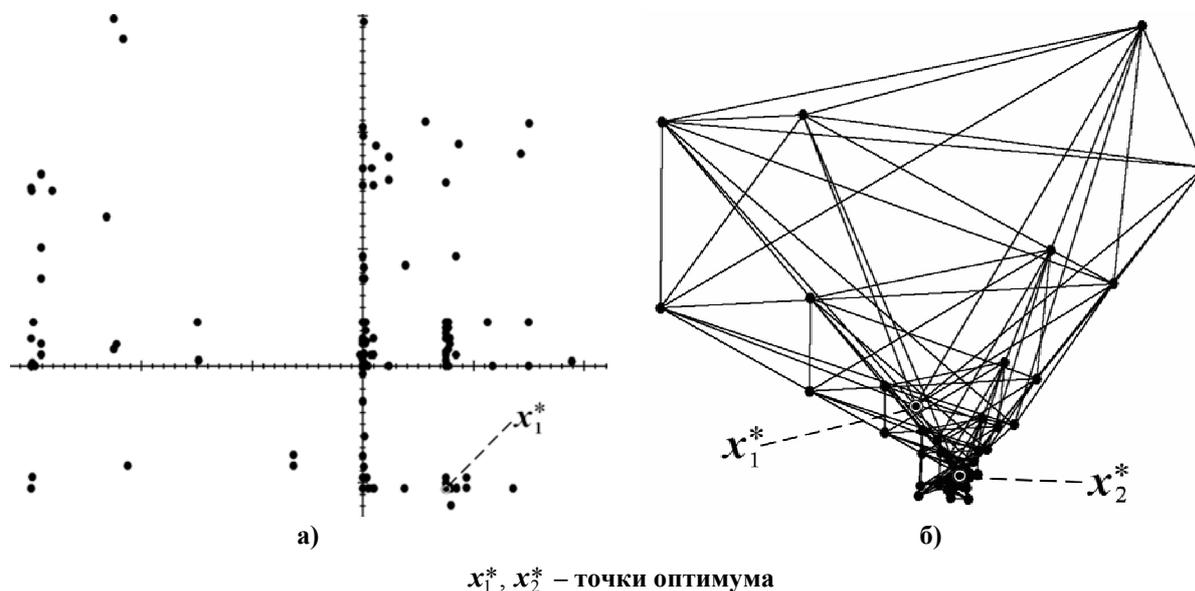
Помимо прямых ограничений на параметры для обеспечения постоянства режима течения накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне $\pm 5\%$ ($\pm 0,065$ кг/с) от исходного.

Значения проектных параметров до и после оптимизации приведены в таблицах 1, 2. Наиболее существенно изменились параметры угла установки лопатки РК ТВД (на $1,53^\circ$) и угла установки лопатки РК ТНД (на $-6,0^\circ$). Значение функции цели (КПД) достигло $85,64\%$ (увеличение на $2,5\%$). Для РК ТНД потери кинетической энергии уменьшились по всей высоте лопатки (см. 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 [11]. Множество параметров оптимизации такое же, как и в предыдущем исследовании. На первом этапе с помощью генетического алгоритма приближенно определялся глобальный экстремум целевой функции x_1^* (рис. 7а). 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 в солвере сетки второго уровня. Полученная оптимальная точка – x_2^* (рис. 7б).

В данном исследовании более всего изменились параметры крутки лопатки РК ТВД (на $7,9^\circ$) и крутки лопатки РК ТНД (на $-11,1^\circ$). Значение функции цели (общий КПД турбины) достигло $85,17\%$ (увеличение на $1,95\%$). Для РК ТНД потери кинетической энергии с учетом потерь с выходной скоростью в целом уменьшились по высоте лопатки (см. рис. 5), за исключением прикорневой области, где наблюдается небольшой рост потерь. Среднее значение абсолютного тангенциального угла выхода потока из РК ТНД $\bar{\beta}_c = 0,23^\circ$ (см. рис. 6). Таким образом, направление выхода потока из ТНД стало очень близко к осевому направлению. Качество обтекания лопаток РК в

ступени ТВД несколько улучшилось за счет уменьшения интенсивности вторичных течений у корня и радиальных перетеканий в зазоре (рис. 3б, 4б).



а – этап 1 (генетический алгоритм); **б** – этап 2 (метод Нелдера-Мида)

Рис. 7. Поиск оптимума гибридным методом. Проекция на плоскость изменения параметров: крутка лопатки РК ТВД – крутка лопатки РК ТНД

Необходимо отметить, что в проведенных исследованиях (оптимизация 1 и 2), были получены различные оптимальные решения. Это объясняется использованием различных уровней модели при расчете течения. Уровень применяемой численной модели определяется уровнем сеточного разбиения. 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 были 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 не приводит к улучшению функции цели. Пространственное профилирование лопаток НА ТНД, в связи с малым зазором между стойками и НА, приводило к ухудшению обтекания 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, уменьшились потери кинетической энергии, повысился КПД турбины.

– Направление потока на выходе из РК ТНД стало близким к осевому направлению, что в свою очередь привело к уменьшению потерь с выходной скоростью.

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 Turbomachinery 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. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
5. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 535 с.
6. *Torczon V.J.* Multi-Directional Search: A Direct Search Algorithm for Parallel Machines // A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for 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, 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. *Wilcox D.C.* Turbulence modeling for CFD / D.C. Wilcox. – 2nd ed. – DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998. – 537 p.
10. *Menter F.R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. – 1994. – V. 32, № 8. – P. 1598–1605.
11. *Haupt R.L.* Practical genetic algorithms / R.L. Haupt, S.E. Haupt. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 253 p.

© Яковлев В.А., Ершов С.В., 2009