

УДК 621.165:532.6

**С.В. ЕРШОВ, В.А. ЯКОВЛЕВ**

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

## **АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

Описан подход к аэродинамической оптимизации пространственной формы лопаток турбин на основе использования трехмерных моделей расчета вязкого течения в лопаточных аппаратах турбин. Оптимизационные процедуры включают в себя прямые методы локального поиска, эвристические методы глобального поиска, а также их гибридизацию. Представлены результаты оптимизационных исследований лопаточных аппаратов ступеней паровых и газовых турбин. Полученные в ходе проведенных исследований результаты позволяют улучшить качество обтекания, уменьшить потери, а также повысить КПД ступеней турбин.

**турбина, лопаточный аппарат, пространственное профилирование, вычислительная аэродинамика, трехмерное вязкое течение, оптимизация**

### **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 – 3].

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

### **1. Постановка задачи и методы расчета**

Задача оптимизации пространственной формы лопаток турбинной ступени формулируется следующим образом: найти максимум КПД ступени при ограничениях накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры. Измене-

ние 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 [4], метод Торкзон [5]), так и глобальной оптимизации (генетический алгоритм [6]). 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* [7], в котором реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу [8]. Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST Ментера [9]. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазилинейной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

## 2. Оптимизация ступени паровой турбины

Описанный подход использован для оптимизации геометрии лопаток направляющего аппарата (НА) ступени паровой турбины [10]. Оптимизация выполнялась с помощью метода Нелдера-Мида. В первую очередь варьировались параметры, которые, по предварительным оценкам, могут улучшить как качество обтекания, так и характеристики ступени в целом. Оптимизация проводилась по семи параметрам, шесть из которых относились к НА:

- угол установки лопатки;
  - крутка лопатки (угол поворота каждого сечения относительно корневого в плоскости сечения) с линейным законом распределения по высоте;
  - угол осевой саблевидности на периферии;
  - длина осевой саблевидности на периферии;
  - угол окружной саблевидности у корня;
  - длина окружной саблевидности у корня;
- и один к рабочему колесу (РК) – угол установки рабочей лопатки.

Помимо прямых ограничений на параметры накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне  $\pm 0,5$  кг/с от исходного.

В результате оптимизации наиболее существенно изменились параметры, характеризующие саблевидность лопатки (рис. 1). При этом КПД ступени

повысился на 0,8%, а потери кинетической энергии были уменьшены на 1,1%.

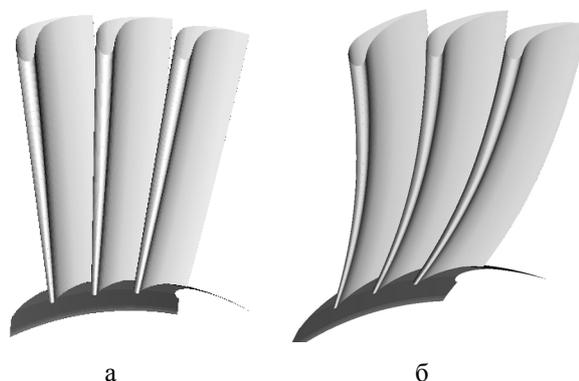


Рис. 1. Направляющие лопатки ступени: а – исходные; б – оптимизированные

## 3. Оптимизация двух ступеней газотурбинного двигателя

В качестве объекта исследования рассмотрена двухступенчатая турбина ГТД, состоящая из ступени ТВД и ступени ТНД. Геометрические характеристики и газодинамические характеристики ступеней турбины (как исходной конструкции, так и после оптимизации) даны в табл. 1.

Особенностью данного исследования является совместная (одновременная) оптимизация двух ступеней турбины. Оптимизация велась по следующим параметрам:

- угол установки лопатки (корневого сечения) для направляющих и рабочих лопаток обеих ступеней;
- крутка лопатки для рабочих лопаток ТВД и лопаток обоих венцов ТНД.

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

Для обеспечения постоянства режима течения накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне  $\pm 0,4$  кг/с от исходного.

Оптимизация выполнялась с помощью гибридного метода, построенного на базе последовательного подхода. На первом этапе с помощью генетиче-

ского 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. На втором этапе значение оптимума уточнялось методом Нелдера-Мида. Этот этап выполнялся с использованием в солвере сетки второго уровня.

Таблица 1

Геометрические и газодинамические характеристики ступеней газотурбинного двигателя

	Параметр	ТВД				ТНД			
		Исходная		Оптимизи- рованная		Исходная		Оптимизи- рованная	
		Статор	Ротор	Статор	Ротор	Статор	Ротор	Статор	Ротор
Варьируемые параметры	Корневой угол установки, град	-50,1	22,9	-50,1	23,7	-42,8	18,5	-41,5	21,6
	Угол закрутки, град	—	21,4	—	19,5	-3,5	18,5	-3,3	18,6
Фиксирован- ные параметры	Относительная длина лопатки, $l/b$ *	0,62	1,46	0,62	1,46	0,95	2,59	0,95	2,59
	Относительный шаг решетки, $t/b$ *	0,76	0,81	0,76	0,81	0,69	0,79	0,69	0,79
	Веерность решетки, $D_{cp}/l$	15,4	15,3	15,4	15,3	10,5	8,4	10,5	8,4
	Количество лопаток, $z$	40	86	40	86	45	86	45	86
Выходные параметры	Угол выхода, $\alpha_{1эф}$ , град *	15,1	21,9	15,0	22,1	18,8	29,9	20,1	27,1
	Реактивность, $\rho$	0,360		0,383		0,161		0,294	
Ограничение	Расход, $G$ , кг/с	73,54		73,33		73,47		73,32	
Целевая функция	Адиабатический КПД, $\eta_{ад}$ , %	87,0		85,6		82,1		84,1	

\* по среднему сечению

В результате оптимизации адиабатический КПД проточной части в целом увеличился на 1%. Значения проектных параметров до и после оптимизации приведены в табл. 1. Наиболее существенно изменились параметры крутки лопатки РК ТВД (на  $1,9^\circ$ ) и угол установки лопатки РК ТНД (на  $3,0^\circ$ ).

В ступени ТВД потери кинетической энергии изменились незначительно (рис. 2), а значение реактивности несколько увеличилось (рис. 3, а).

В ступени ТНД повысилась реактивность по всей высоте лопатки и стала положительной у корня (рис. 3, а). Потери кинетической энергии (в том числе и с учетом потерь с выходной скоростью) существенно уменьшились (рис. 4).

Анализ результатов показал, что течение в ступени ТВД не претерпело существенных изменений. В то же время в оптимизированной ступени ТНД качество обтекания, как видно из рис. 5 – 7, значи-

тельно улучшилось. Повысилась реактивность в прикорневой зоне РК, практически полностью исчезли отрывы в РК ТНД, уменьшились радиальные перетекания на стороне разрежения РК, вызванные вторичными течениями.

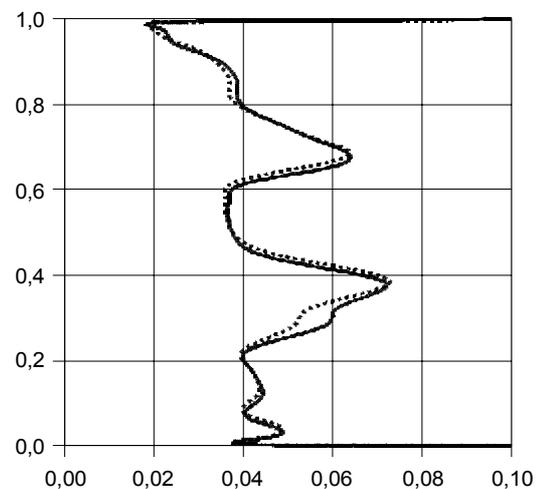


Рис. 2. Потери кинетической энергии в ступени ТВД: — исходная ступень; ---- оптимизированная

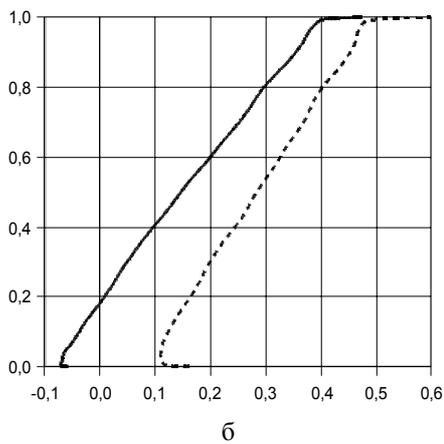
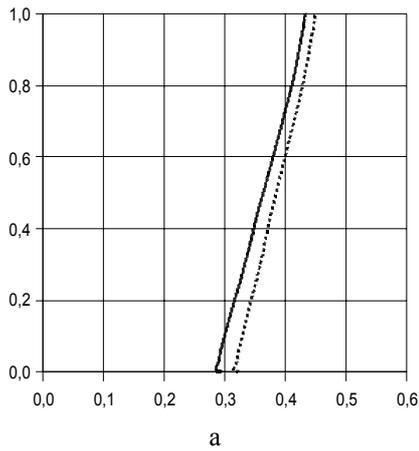


Рис. 3. Распределение степени реактивности по высоте лопатки:  
а – ступень ТВД, б – ступень ТНД  
— исходная конструкция;  
---- оптимизированная

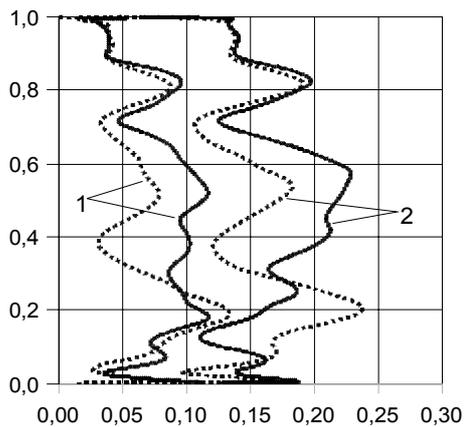


Рис. 4. Потери кинетической энергии в ступени ТНД:  
1 – без учета потерь с выходной скоростью;  
2 – с учетом потерь с выходной скоростью;  
— исходная конструкция;  
---- оптимизированная

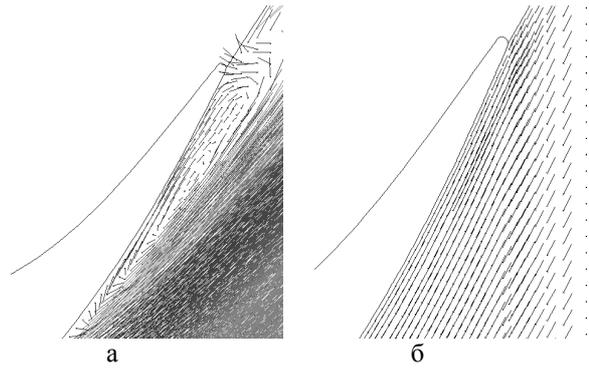


Рис. 5. Векторы скорости в среднем сечении рабочей лопатки ТНД:  
а – исходная конструкция; б – оптимизированная

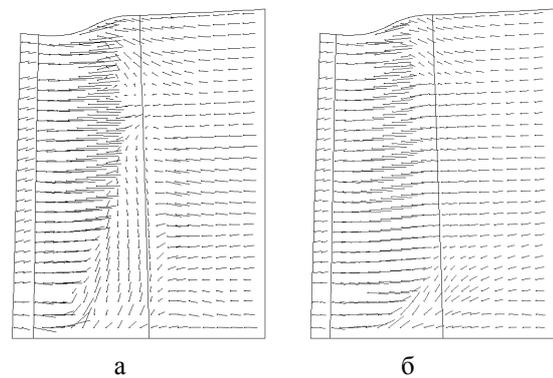


Рис. 6. Векторы скорости на поверхности рабочей лопатки ТНД:  
а – исходная конструкция; б – оптимизированная

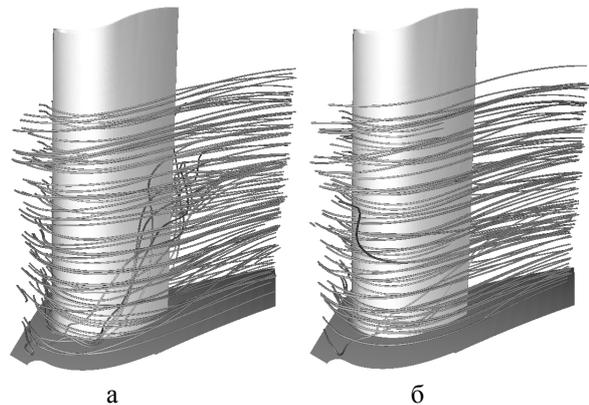


Рис. 7. Линии тока в межлопаточном канале рабочего колеса ТНД:  
а – исходная конструкция; б – оптимизированная

## Заключение

1. Предложен подход к аэродинамической оптимизации пространственной формы лопаток турбин на основе трехмерных моделей расчета течения.

2. С использованием 3D моделей расчета течения выполнена совместная оптимизация двух ступеней газовой турбины.

3. В результате оптимизации турбинных ступеней наблюдалось снижение потерь кинетической энергии и повышение КПД, причиной которых являлось улучшение качества обтекания лопаточных аппаратов, а именно – устранение отрицательной реактивности у корня, уменьшение интенсивности вторичных течений, ликвидация отрывов потока.

4. Последовательная гибридизация генетического алгоритма и метода деформируемого многогранника показала себя эффективной стратегией оптимизации турбинных ступеней.

5. Полученные в результате проведенных исследований результаты продемонстрировали целесообразность и эффективность предложенного подхода к решению задачи пространственного профилирования лопаточных аппаратов и оптимизации проточных частей турбин.

### Литература

1. Torre A., Cecchi S. Latest Developments and Perspectives in the Optimised Design of LP Steam Turbines at ANSALDO // 7<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Athens, Greece – 2007. – P. 19-40.
2. Demeulenaere A., Braembussche R.V. Three-dimensional inverse method for turbomachinery blading design // 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., Yershov S. Direct Constrained Computational Fluid Dynamics Based Optimization of Three-Dimensional Blading for the Exit Stage of a Large Power Steam Turbine // Transactions of the ASME. Journal Engineering for Gas Turbines and Power. – 2003. – 125, No 1. – P. 385-390.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 535 с.
5. 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.
6. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989. – 408 p.
7. Ершов С.В., Русанов А.В. Комплекс программ розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER»: Свідोцтво про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.
8. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – 2<sup>nd</sup> ed. – DCW Industries, Inc., La Canada, California, 2004. – 540 p.
9. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. – 1994. – 32, No 11. – P. 1299-1310.
10. Русанов А.В., Ершов С.В., Пашенко Н.В., Яковлев В.А. Аэродинамическое совершенствование последней ступени цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 200 МВт // Пробл. машиностроения. – 2007. – 10, № 4. – С. 53-61.

*Поступила в редакцию 27.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.