

УДК 621.165+621.438

С. В. Ершов, д-р техн. наук**В. А. Яковлев**, канд. техн. наукИнститут проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua, yava@ipmach.kharkov.ua)

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАТОЧНЫХ АППАРАТОВ ТУРБИН: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваются вопросы аэродинамической оптимизации ступеней паровых и газовых турбин. Дана постановка задачи, кратко описаны метод и технология расчетных исследований, базирующаяся на использовании трехмерных моделей расчета вязкого течения в проточных частях турбомашин. Приведены результаты исследований по аэродинамическому совершенствованию лопаточных аппаратов ступеней паровых и газовых турбин.

Розглядаються питання аеродинамічної оптимізації ступенів парових і газових турбін. Надана постановка задачі, коротко описані метод і технологія розрахункових досліджень, що базується на використанні тривимірних моделей розрахунку в'язкої течії в проточних частинах турбомашин. Наведено результати досліджень з аеродинамічного удосконалення лопаткових апаратів ступенів парових і газових турбін.

Введение

Аэродинамическое проектирование и оптимизация геометрических параметров лопаточных венцов современных энергетических турбин и авиационных газотурбинных двигателей на сегодняшний день является важной научно-технической задачей, что связано с непрерывным повышением требований к экономичности и надежности данных образцов техники. На этапах доводки и модернизации паровых и газовых турбин преследуется цель повышения экономичности проточных частей, в том числе и за счет применения нового, аэродинамически совершенного лопаточного аппарата. При этом часто стоит задача не разработки принципиально новой проточной части турбомашин, а усовершенствование уже существующего прототипа конструкции, что подразумевает такие изменения геометрической формы лопаток, которые не будут приводить к изменению основных размеров проточной части. При таком подходе одним из резервов повышения экономичности ступеней турбин является использование оптимального пространственного профилирования лопаточных аппаратов. Под пространственным профилированием понимается возможность осуществления модернизации или доводки турбинной ступени путем получения аэродинамически более совершенной конструкции с помощью трехмерных моделей расчета течения [1]. Однако применение трехмерных моделей и CFD программ само по себе не дает ответа на вопрос, как повлиять на негативные явления, которые могут наблюдаться в проточной части турбины (неравномерность распределения параметров по высоте лопатки, интенсивные вторичные течения, отрывы потока и др.), чтобы улучшить характеристики как лопаточных венцов, так и турбины в целом. Один из возможных вариантов решения данной проблемы состоит в интеграции CFD программ с алгоритмами оптимизации и постановке задачи оптимального пространственного профилирования лопаточных аппаратов турбин. На основе решения оптимизационной задачи появляется возможность выбора геометрии лопаточных венцов, характеристики которых в наибольшей степени соответствуют поставленным целям и задачам.

В ИПМаш НАН Украины исследования по аэродинамическому усовершенствованию лопаточных аппаратов проточных частей турбин с учетом трехмерной структуры потока были начаты более 15 лет назад [2]. К 2000 году под руководством Ершова С. В. была создана программа Optimus. Для расчета трехмерного течения и определения функции цели ис-

пользовались компоненты CFD решателя FlowER [3]. С помощью комплекса Optimus-FlowER был выполнен целый ряд оптимизационных исследований конкретных турбинных ступеней [4, 5]. Однако, несмотря на положительный опыт использования программы Optimus, она обладала рядом функциональных ограничений и некоторыми недостатками, связанными с программной реализацией и стабильностью работы.

В данной статье представлено дальнейшее развитие исследований по аэродинамическому совершенствованию лопаточных аппаратов турбин с точки зрения методологии, функциональных возможностей, выбора объектов исследования.

Методика исследований

Для решения задачи пространственного профилирования лопаточных аппаратов турбин сформулирован ряд положений, которые составляют методологическую основу организации и проведения комплекса исследований:

- использование трехмерных моделей расчета течения вязкого газа для оценки степени аэродинамического совершенства проточной части турбин;
- применение эффективных математических методов оптимизации, в том числе гибридных подходов, сочетающих в себе методы глобального и локального поиска экстремума;
- использование прототипов конструкций, на базе которых осуществляется поиск усовершенствованной конструкции;
- выбор относительно небольшого набора параметров, изменение которых позволяет управлять пространственной формой лопатки (при этом геометрическая форма профилей лопаток в заданных сечениях остается неизменной);
- проведение аэродинамических расчетов на сетках с различной степенью разбиения (относительно грубых на итерационных шагах процесса оптимизации и мелких для проверки и уточнения полученного решения).

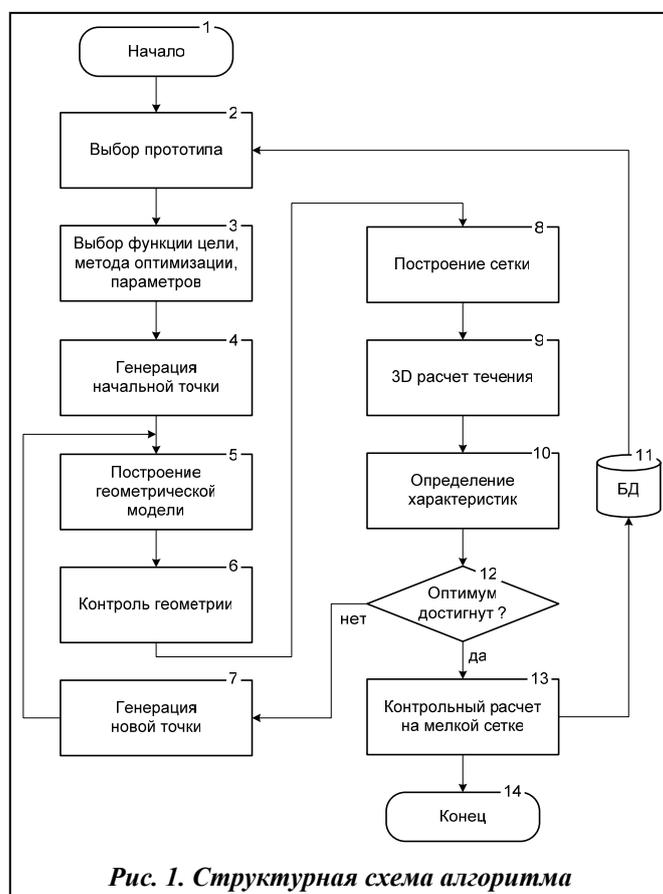


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

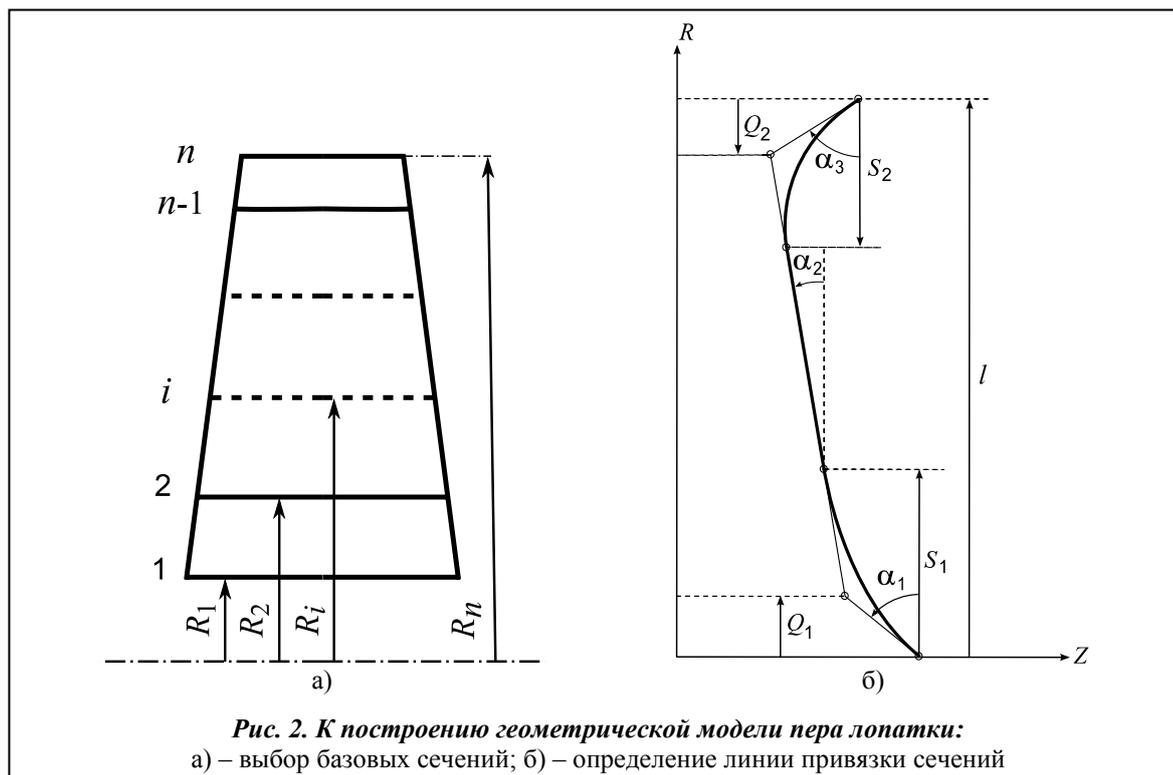
Обобщенная структурная схема алгоритма решения задачи оптимизации с использованием трехмерных моделей расчета течения представлена на рис. 1.

Задача оптимизации пространственной формы лопаток проточной части турбины, состоящей из одной или нескольких ступеней, формулируется следующим образом: найти экстремум функции цели, в качестве которой целесообразно принимать эффективность преобразования энергии – КПД, при ограничениях, накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры

$$\max_x \eta_u = \frac{H_u}{H_0},$$

где η_u – окружной КПД; H_u и H_0 – использованный и располагаемый теплоперепады; x – вектор геометрических параметров.

При создании и совершенствовании последних ступеней мощных паротурбинных агрегатов целевая функция должна также учитывать и пере-



менный режим работы ступени. Поэтому для решения задачи многорежимной оптимизации в качестве функции цели выбран взвешенный КПД ступени с весовыми коэффициентами, соответствующими времени работы турбины на различных режимах ее нагрузки [6]

$$\eta = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \eta_i, \quad w_i = \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k}, \quad i = 1 \dots n,$$

где η_i – КПД ступени на i -м режиме; w_i – весовой коэффициент для i -го режима; t_i – время работы турбины на i -м режиме; n – число различных режимов работы турбины за рассматриваемый промежуток времени.

На геометрические параметры накладываются прямые ограничения, которые задаются интервалами допустимых изменений их значений. Неизменность режима течения обеспечивается заданием ограничения на массовый расход рабочего тела через ступень.

Кроме того, могут быть выставлены дополнительные ограничения на абсолютный тангенциальный угол выхода потока из проточной части и степень реактивности ступени. Статическая прочность обеспечивается применением прочностных ограничений, рассчитываемых на основе использования стержневой модели лопатки.

Трехмерная геометрическая модель (ГМ) турбинной лопатки задается набором двухмерных сечений, выстраиваемых по высоте вдоль линии привязки (в иностранной литературе – *stacking line*), которая может быть как прямой, так и криволинейной и проходит через характерные точки сечений (рис. 2).

Шаги построения ГМ:

- определяются базовые сечения на соответствующих радиусах R_i (рис. 2, а), используя 2D геометрическую модель;
- при малом количестве исходных сечений генерируются промежуточные сечения путем интерполяции (линейной или квадратичной);
- определяется точка привязки в сечении: центр тяжести для лопаток рабочего колеса (РК), входная/выходная кромка для лопаток направляющего аппарата (НА);

– формируется линия привязки сечений. Эта линия задается в двух направлениях – осевом и окружном – и в общем виде представляется тремя участками (рис. 2, б). Средний участок – отрезок прямой (линейная зависимость), корневой и периферийный – кривая второго порядка (парабола) или кривая Безье (квадратичная кривая).

Применительно к описанию криволинейных участков линии привязки первая точка – это конец лопатки (корень, периферия, пересечение с обводом), вторая – промежуточная, третья – точка сопряжения со средней линейной частью. Первая точка – начальная, вторая определяется углом α_1 и длиной Q_1 , третья точка расположена на расстоянии S_1 на линии, проходящей через вторую точку и составляющей угол α_2 с радиальным направлением. Таким образом, обеспечивается непрерывность производной в точке сопряжения участков. Второй конец среднего прямого участка задается расстоянием S_2 . Определение 3-го участка аналогично определению 1-го. При этом вторая точка этого участка задается углом α_3 и длиной Q_2 .

Опираясь на предложенную параметризацию пера лопатки, множество геометрических параметров разбито на две группы: параметры, характеризующие поворот сечения лопатки в плоскости сечения; параметры, относящиеся к размещению сечений в пространстве по закону, определяемому линией привязки (характеризуют осевой и окружной навалы, а также саблевидность лопатки). Такая ГМ позволяет генерировать достаточное количество конфигураций турбинных лопаток, минимизируя при этом вероятность генерации неработоспособных (или нереальных) конструкций.

Расчеты трехмерного течения выполняются с помощью CFD решателя FlowER [3], в котором реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Данная система уравнений, записанная в локальной криволинейной системе координат, связанной с обтекаемыми телами и вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω , имеет вид

$$\frac{\partial QJ}{\partial t} + \frac{\partial F_j \Psi_{i,j} J}{\partial \Psi_i} = HJ,$$

где

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ h \end{bmatrix}; \quad F_j = \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_1 u_j + \delta_{1j} p - \tau_{1j} \\ \rho u_2 u_j + \delta_{2j} p - \tau_{2j} \\ \rho u_3 u_j + \delta_{3j} p - \tau_{3j} \\ (h+p)u_j - u_i \tau_{ij} + q_j \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\rho u_2 \Omega + \rho \Omega^2 r_x \\ -2\rho u_1 \Omega + \rho \Omega^2 r_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$h = \rho \left[e + \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 - \Omega^2 r^2}{2} + k \right]; \quad \Psi_{i,j} = \frac{\partial \Psi_i}{\partial x_j};$$

Q – вектор консервативных переменных; F_j – векторы потоков; H – вектор источников членов; J – якобиан преобразования координат; Ψ_i – криволинейные координаты; u_j – декартовы компоненты скорости; τ_{ij} – тензор напряжений; ρ – плотность; Ω – скорость вращения; p – давление; k – кинетическая энергия турбулентности; r – расстояние от оси вращения до текущей точки; r_x, r_y – проекции r на оси x, y соответственно; δ_{ij} – символ Кронекера; q – тепловой поток; e – внутренняя энергия единичной массы.

Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST $k-\omega$ Ментера [7]. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазимоноотонной ENO-схемы второго порядка аппроксимации [8].

При проведении аэродинамической оптимизации лопаточных аппаратов турбин помимо выбора трехмерной модели расчета течения и подходящих алгоритмов оптимизации

очень важен выбор сеточной дискретизации расчетной области. В решателе FlowER при моделировании течений в настоящее время используется три уровня сеточного разбиения. Более мелкая сетка строится путем подразбиения ячейки на две по каждой из трех координат. Таким образом, в трехмерном случае каждая грубая ячейка содержит восемь ячеек промежуточной сетки, а каждая ячейка промежуточной сетки – восемь ячеек мелкой. На основе проведения ряда вычислительных экспериментов сформирована стратегия выбора расчетной сетки для задачи оптимального пространственного профилирования с использованием трех уровней сеточного разбиения. В результате за базовый уровень дискретизации расчетной сетки при проведении оптимизационных исследований был принят уровень 2 (около 100 000 ячеек на один межлопаточный канал ступени).

Следует отметить, что погрешность расчета на сетках различного уровня носит систематический характер, что, в свою очередь, косвенно свидетельствует о допустимом использовании грубых сеток. Поэтому на первых этапах работы гибридных методов оптимизации предлагается проводить расчеты с использованием сетки первого уровня. Учитывая, что в технических системах экстремум не может быть достаточно острым, при поиске с помощью генетического алгоритма (ГА) достаточно попасть в окрестность предполагаемого оптимума. Уточнение точки оптимума необходимо проводить на сетках второго уровня, а окончательное определение газодинамических характеристик исследуемой конструкции – путем контрольного расчета на мелкой сетке третьего уровня разбиения. Использование данной стратегии позволяет существенно сократить вычислительные затраты.

Для проведения оптимизационных исследований разработан диалоговый программный комплекс Optimus-2. Оптимизационные процедуры включают в себя прямые методы локального поиска (Нелдера–Мида [9] и многонаправленного поиска [10]), методы глобального поиска – ГА, а также их гибридизацию. Построение гибридного метода оптимизации основано на схеме последовательного применения ГА и методов прямого поиска.

Одним из экономичных и в то же время эффективных вариантов генетического алгоритма является микро-ГА – модификация классического ГА, предназначенная для решения задач, не требующих больших популяций и длинных хромосом [11]. Такие алгоритмы применяются при ограниченном времени вычислений в случае, когда необходимо быстро найти оптимальное или близкое к нему («почти оптимальное») решение. Таким образом, микро-ГА позволяет находить несколько худшие решения, однако существенно экономит вычислительные ресурсы компьютера за счет сокращения трудоемких вычислений, связанных с большим количеством итераций.

В алгоритме микро-ГА размер популяции небольшой и фиксированный (в реализованных в Optimus-2 алгоритмах – 5, 10). Используется элитарная стратегия, которая предотвращает потерю «хороших» хромосом. Выполняется турнирный детерминированный отбор. Скрещивание проводится с вероятностью 1. Мутация не требуется, так как достаточное разнообразие обеспечивается формированием новой популяции при каждом «рестарте» алгоритма. Для предотвращения преждевременной сходимости предусмотрена процедура «рестарта» алгоритма.

Программные модули комплекса Optimus-2 написаны на языках Java и Fortran с применением элементов технологии объектно-ориентированного программирования. Выполнена проверка работоспособности программных реализаций используемых методов оптимизации на ряде тестовых функций, обладающих овражным характером, многоэкстремальностью, многомерностью.

Аэродинамическая оптимизации последней ступени мощной паровой турбины

В качестве объекта исследования рассмотрена последняя ступень одной из трехступенчатых модификаций ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт с длиной рабочей лопатки 755 мм. В табл. 1 приведены основные геометрические характеристики ступени.

Таблица 1. Геометрические характеристики последней ступени ЦНД

Параметр	Статор	Ротор
относительная длина лопатки, l/b *	3,42	6,95
относительный шаг решетки, t/b *	0,77	0,59
веерность решетки, $D_{ср}/l$	3,1	2,95
число лопаток, z	42	94
эффективный угол выхода потока $\alpha_{1эф}, \beta_{2эф}$, градус *	14,8	31,61

* на среднем диаметре

Для анализа этой конструкции выполнены расчеты трехмерного вязкого течения в исследуемой ступени на всех четырех основных режимах, определяемых по давлению в конденсаторе (12,3; 8,0; 5,0 и 3,5 кПа) на достаточно мелкой сетке с общим числом ячеек $2 \times 72 \times 60 \times 88 = 760320$. Граничные условия на входе в ступень задавались с фиксацией полного давления и полной температуры, а на выходе выставлялось статическое давление для каждого из рассматриваемых режимов. Расчеты показали, что в корневых сечениях реактивность ступени очень мала. Это приводит к отрыву потока в прикорневых сечениях на стороне разрежения лопатки РК для всех режимов работы и соответственно недостаточной эффективности ступени.

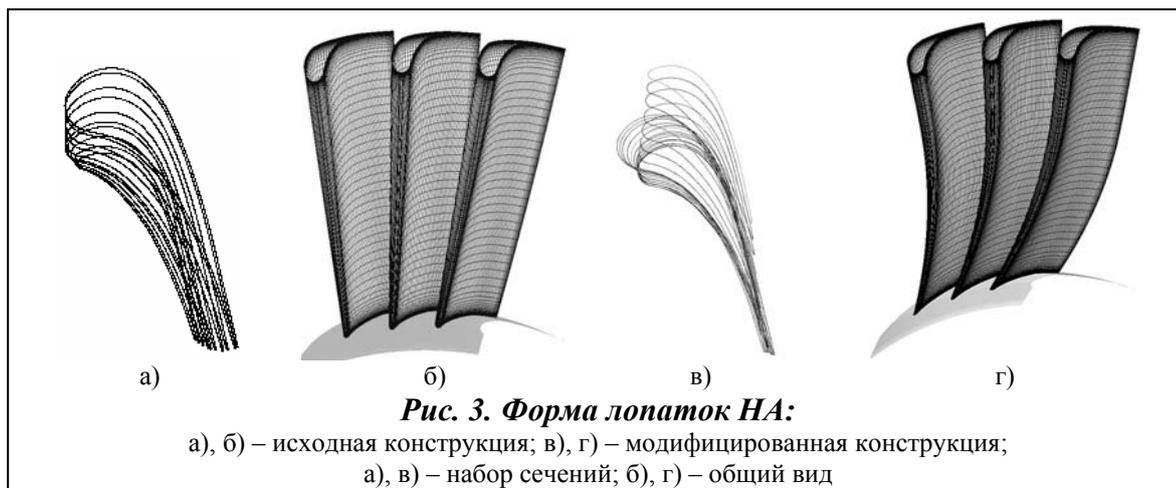
Первый этап исследований состоял в выполнении однорежимной аэродинамической оптимизации ступени. Оптимизация проводилась на режиме максимального КПД турбины (режим № 2, статическое давление за ступенью 8,0 кПа). Общее число параметров – семь. Шесть из них относились к НА: угол установки лопатки; крутка 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 РК – угол установки рабочей лопатки. Первый и последний параметры обеспечивают газодинамическое согласование РК и НА. В качестве целевой функции выбран КПД ступени. Накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне $\pm 0,5$ кг/с (0,9 %) от исходного. Оптимизация выполнялась с помощью метода Нелдера-Мида. Результаты данных исследований опубликованы в [12].

Второй этап состоял в проведении многорежимной оптимизации последней ступени. Выбор весовых коэффициентов w_i для целевой функции опирался на публикации по оценке и анализу работы ЦНД мощных паровых турбин в условиях работы конкретных электростанций Украины [13, 14]. Для рассматриваемых режимов работы (1–4) значения этих коэффициентов соответственно равны: 0,33; 0,33; 0,17; 0,17.

Оптимизация выполнялась с помощью гибридного метода по тем же геометрическим параметрам, как и при однорежимной оптимизации. Поиск окрестности глобального экстремума осуществлялся с помощью микро-ГА на сетке первого уровня разбиения (11880 ячеек в одном канале), а уточнение его положения проводилось методом Нелдера-Мида на сетке второго уровня разбиения (95040 ячеек). Проверочные расчеты выполнялись на сетке третьего уровня разбиения (760320 ячеек). Основные газодинамические характеристики последней ступени, полученные в результате расчетов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Газодинамические характеристики оптимизированной ступени

Параметры	Режим			
	№1	№2	№3	№4
расход, кг/с	53,64	53,65	53,58	52,9
статическое давление на выходе, кПа	12,3	8,0	5,0	3,46
потери кинетической энергии в ступени, %	6,97	6,76	10,12	10,13
реактивность	0,326	0,489	0,615	0,683
мощность ступени, МВт	6,49	9,2	10,5	10,6
КПД ступени, %	87,61	84,96	73,42	61,39



В результате оптимизации наиболее существенно изменились параметры, характеризующие саблевидность лопатки НА:

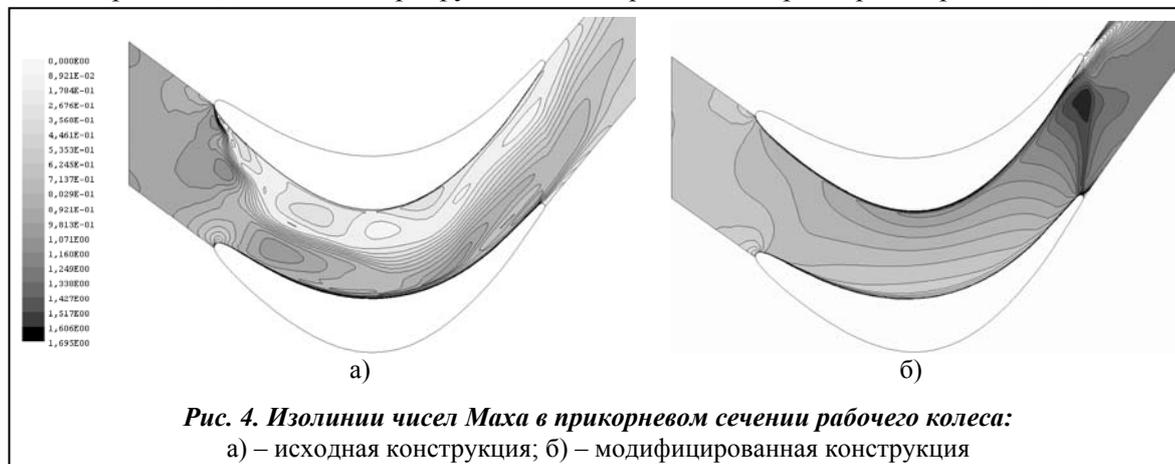
- угол осевой саблевидности на периферии $-6,7^\circ$ при длине участка саблевидного искривления $0,4$ высоты лопатки;
- угол окружной саблевидности у корня $24,3^\circ$ при длине участка саблевидного искривления $0,6$ высоты лопатки.

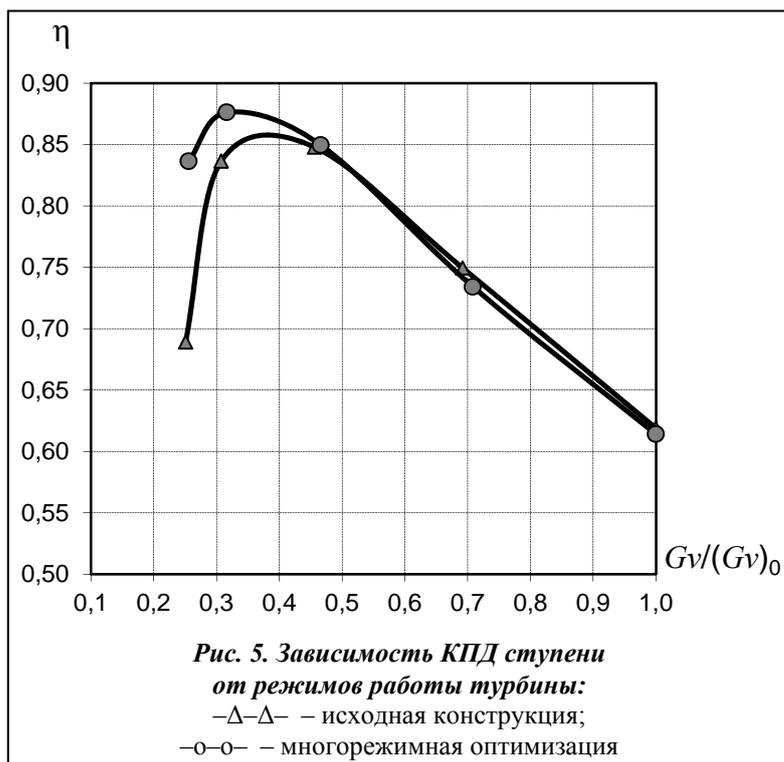
Угол установки лопатки РК изменился на $2,7^\circ$, а изменение параметров угла установки и крутки лопатки НА оказалось незначительным (менее $1,0^\circ$).

Форма лопаток НА исходной и усовершенствованной ступеней приведена на рис. 3, а на рис. 4 показана структура течения в канале рабочего колеса.

По сравнению с исходной конструкцией был устранен прикорневой отрыв потока и существенно уменьшены радиальные перетекания на стороне разрежения лопатки РК, вызванные вторичными течениями. Эти изменения являются следствием повышения степени реактивности у корня, обусловленного саблевидной формой усовершенствованной лопатки НА. В результате уменьшились потери кинетической энергии и повысился КПД ступени. График КПД для различных режимов приведен на рис. 5. На данном графике кроме результатов для четырех рассмотренных режимов приведены данные для дополнительного режима пониженной нагрузки ($Gv/(Gv)_0 = 0,25$). Несмотря на небольшое снижение КПД ступени на некоторых режимах по сравнению с однорежимной оптимизацией, осредненный по всем режимам КПД ступени повысился на $0,4\%$.

Следует отметить, что в обоих исследованиях – как при однорежимной, так и при многорежимной оптимизации – получены похожие формы лопаток (с некоторым отличием в параметрах саблевидности). Это объясняется тем, что, с одной стороны, в этих исследованиях выбирались одинаковые варьируемые геометрические параметры с ориентацией на саб-





левидные лопатки, а с другой – устранение отрывов в корневых сечениях ротора наиболее эффективно достигается увеличением реактивности ступени в прикорневой области рабочей лопатки.

Аэродинамическая оптимизация ступеней газовых турбин

В качестве первого объекта исследования рассмотрена двухступенчатая турбина ГТД, состоящая из ступени высокого давления (ТВД) и ступени низкого давления (ТНД) – рис. 6.

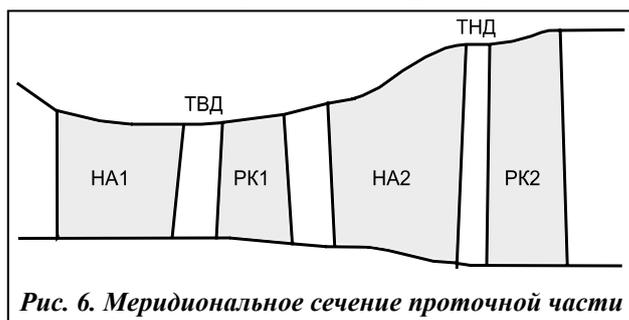
Для анализа исходной конструкции выполнены расчеты трехмерного вязкого течения в исследуемой проточной части турбины на

достаточно мелкой сетке с общим числом ячеек $4 \times 72 \times 72 \times 112 = 2\,322\,432$. 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 (с линейным законом изменения по высоте лопатки).

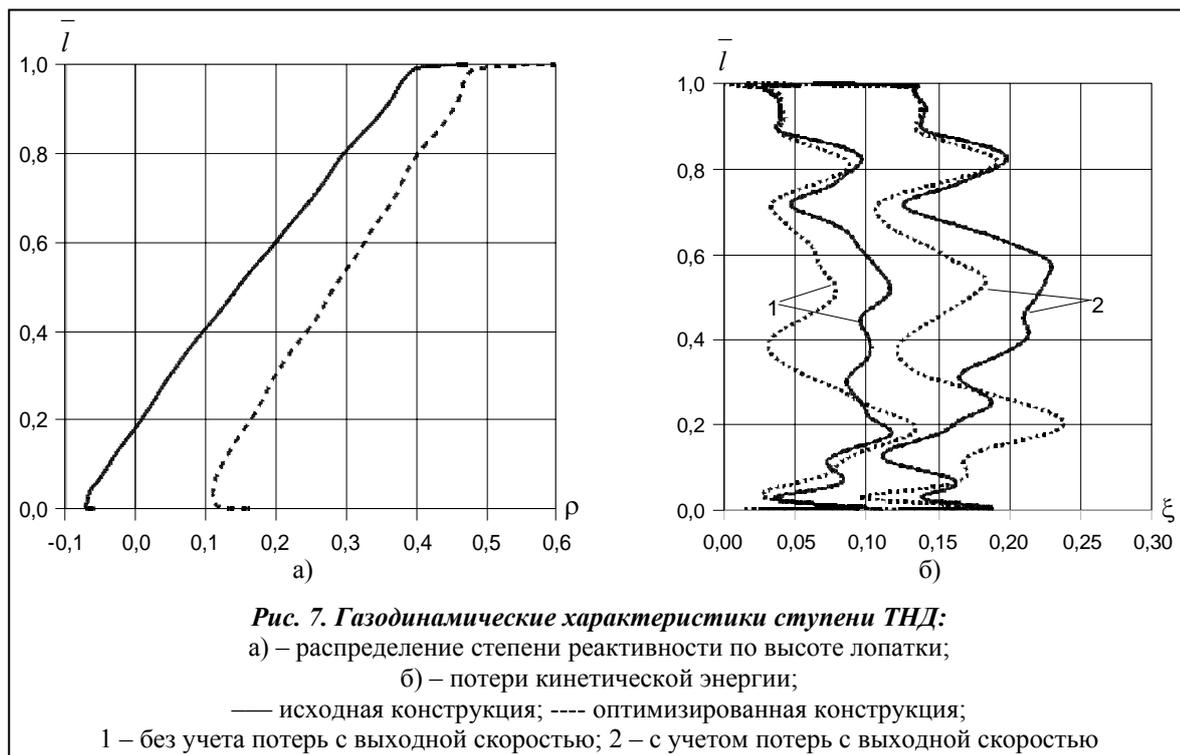
Накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела через ступень в диапазоне $\pm 0,4$ кг/с от исходного. Оптимизация выполнялась с помощью гибридного метода. На первом этапе с помощью микро-ГА приближенно определялся глобальный экстремум целевой функции. На этом этапе решатель FlowER работал с достаточно грубой сеткой (36 288 ячеек для одного канала). На втором этапе значение оптимума уточнялось методом Нелдера–Мида с использованием в решателе сетки второго уровня (290 304 ячеек для одного канала). Поверочные расчеты проводились на сетке третьего уровня с числом ячеек 2 322 432.

В результате оптимизации КПД проточной части в целом увеличился на 1%. Наиболее существенно изменились параметры крутки лопатки РК ТВД (на $1,9^\circ$) и угла установки лопатки РК ТНД (на $3,1^\circ$). Максимальное отклонение величины расхода рабочего тела составило 0,21 кг/с, что почти в два раза меньше заданного ограничения. В ступени ТВД потери кинетической энергии изменились незначительно, а значение реактивности несколько увеличилось. В ступени ТНД (рис. 7) повысилась реактивность по всей высоте лопатки и



стала положительной у корня (рис. 7, а). Потери кинетической энергии (в том числе и с учетом потерь с выходной скоростью) существенно уменьшились (рис. 7, б).

В качестве второго объекта исследования рассмотрена проточная часть газовой турбины, являющейся частью газотурбинного двигателя. Она состоит из одноступенчатой турбины высокого дав-

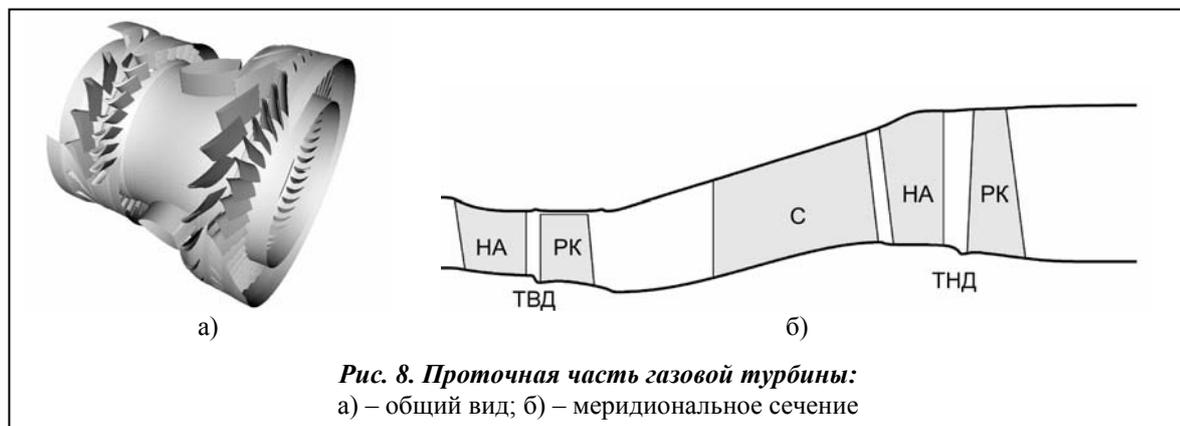


ления (ТВД), одноступенчатой турбины низкого давления (ТНД) и стоек, конструктивно расположенных между ТВД и ТНД (рис. 8). Геометрические и газодинамические характеристики ступеней турбины исходной конструкции приведены в [15].

Анализ исходной конструкции, проведенный на мелкой сетке с общим числом ячеек 2774016, показал наличие интенсивных вторичных течений в РК ТНД в области $0,1 \div 0,5$ высоты лопатки. В результате в этой зоне рабочей лопатки формируются значительные потери кинетической энергии (рис. 9). Кроме того, данная конструкция характеризуется достаточно большим значением абсолютного угла выхода потока из РК ТНД (рис. 10): $-31,43^\circ$.

Для улучшения конструкции проведено ряд оптимизационных исследований. В качестве функции цели выбирался КПД всей турбины. Расчеты течения 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).

Первое исследование (оптимизация 1) выполнялось с помощью метода Нелдера-Мида на грубой сетке первого уровня сеточного разбиения, второе (оптимизация 2) – гибридным методом. Оптимизация проводилась по шести параметрам: угол установки лопатки (корневого сечения) для направляющих и рабочих лопаток ТВД и рабочих лопаток ТНД;



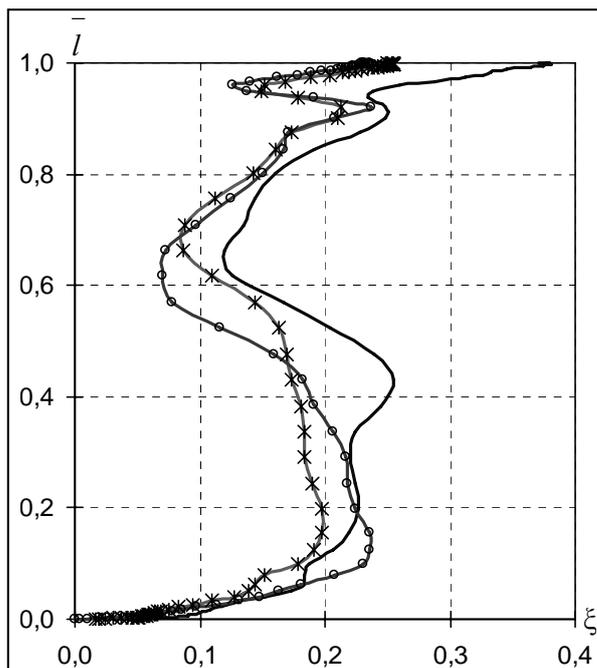


Рис. 9. Потери кинетической энергии в РК ТНД с учетом потерь с выходной скоростью:

— — исходная конструкция;
 -x-x- — оптимизация 1; -o-o- — оптимизация 2

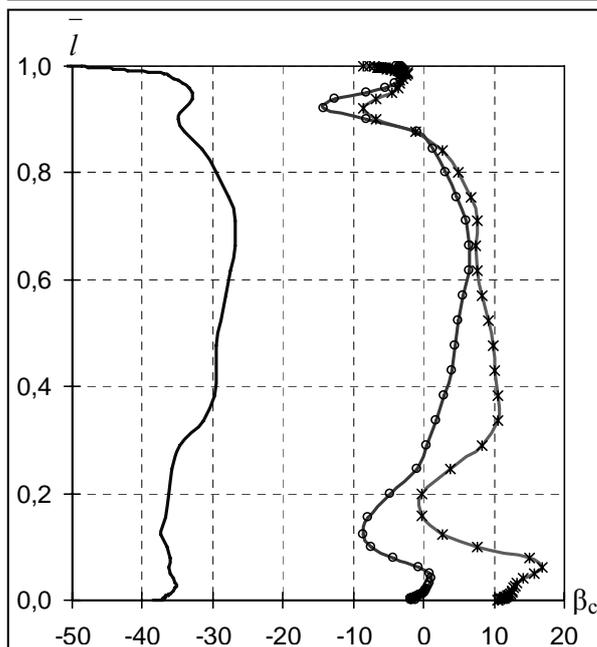


Рис. 10. Абсолютный тангенциальный угол выхода в РК ТНД:

— — исходная конструкция;
 -x-x- — оптимизация 1; -o-o- — оптимизация 2

крутка лопатки для направляющих и рабочих лопаток ТВД и рабочих лопаток ТНД. Изменение угла, характеризующего крутку лопатки, осуществлялось по линейному закону по высоте лопатки. Накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела.

По результатам исследований в качестве лучшего варианта был выбран вариант 2. 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 (рис. 9) за исключением прикорневой области, где наблюдается небольшой рост потерь. При этом КПД ступени ТВД незначительно уменьшился. Среднее значение абсолютного тангенциального угла выхода потока из РК ТНД $\bar{\beta}_c = 0,23^\circ$ (рис. 10). Таким образом, направление выхода потока из ТНД стало близким к осевому направлению. При этом максимальное отклонение по расходу рабочего тела составило 0,017 кг/с.

Заключение

1. Сформулированы основные положения подхода к пространственному профилированию лопаточных аппаратов турбин и разработан обобщенный алгоритм решения поставленной задачи, базирующийся на тесной интеграции CFD программ с алгоритмами оптимизации.

2. Предложена параметризация пера турбинной лопатки, которая позволяет эффективно управлять ее пространственной формой, используя при этом относительно небольшой набор геометрических параметров. Она дает возможность описывать достаточно широкий класс турбинных лопаток как с переменной по радиусу закруткой, так и со сложным тангенциальным навалом.

3. Предложен гибридный метод оптимизации, построенный на базе схемы последовательного применения генетического алгоритма и методов прямого поиска. Гибридный метод показал себя эффективным и в то же время экономичным алгоритмом для оптимизации не только отдельных ступеней, но и многоступенчатых турбин.

4. Определена стратегия проведения оптимизационных исследований, которая со-

стоит в использовании при расчете трехмерного течения разностных сеток различного разрешения на этапах поиска оптимума (относительно грубых на итерационных шагах процесса оптимизации и мелких для проверки и уточнения полученного решения).

5. Сформулированы требования к системе аэродинамической оптимизации лопаточных аппаратов турбин, разработана ее структура и осуществлена практическая реализация на ЭВМ в виде диалогового программного комплекса Optimus-2.

6. С помощью разработанного программного комплекса решен ряд практически важных задач по аэродинамической оптимизации ступеней проточных частей паровых и газовых турбин.

Литература

1. *Аэродинамический* расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, С. В. Ершов и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
2. *Gnesin V. I.* Numerical investigation of the 3D effects for space flow through a turbomachine stage / V. I. Gnesin, S. V. Yershov, A. V. Rusanov // ICFM5/95, Proc. 5th Int. Conf. Fluid Mechanics, Cairo, Egypt. – 1995. – Vol. 2. – P. 443–452.
3. *Ершов 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. Ершов, А. В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 1996. – 1 с.
4. *Ершов С. В.* Пространственное профилирование лопаточных аппаратов турбинной ступени на основе решения задач трехмерного вязкого течения и оптимизации / С. В. Ершов, А. Ю. Шапочка // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сб. науч. тр. – Харьков: Ин-т пробл. машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2000. – С. 171–178.
5. *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 // Trans. ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power. – 2003. – Vol. 125, No. 1. – P. 385–390.
6. *Щегляев А. В.* Паровые турбины: В 2 кн. Кн. 2 / А. В. Щегляев. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 416 с.
7. *Menter F. R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications / F. R. Menter // AIAA J. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605.
8. *Ершов С. В.* Квазимонотонная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса / С. В. Ершов // Мат. моделирование. – 1994. – Т. 6, № 11. – С. 63–75.
9. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 535 с.
10. *Torczone V. J.* Multi-Directional Search: A Direct Search Algorithm for Parallel Machines / V. J. Torczon // A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy Approved, Rice University, Houston, Texas, 2004. – 114 p.
11. *Krishnakumar K.* Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization / K. Krishnakumar // SPIE Proc.: Intelligent Control and Adaptive Systems. – 1989. – Vol. 1196. – P. 289–296.
12. *Аэродинамическое* усовершенствование последней ступени цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 200 МВт / А. В. Русанов, С. В. Ершов, Н. В. Пашенко, В. А. Яковлев // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 53–61.
13. *Зайцев М. В.* Выбор варианта паровой турбины в зависимости от условий ее работы / М. В. Зайцев, Е. В. Левченко, Б. А. Аркадьев // Теплоэнергетика. – 1996. – № 3. – С. 64–67.
14. *Оценка* эффективности работы ЦНД турбины Т-250/300-23,5 Харьковской ТЭЦ-5 / О. Н. Слабченко, М. В. Зайцев, А. Ю. Козлоков, А. Д. Золотухин // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестн. НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 41–48.
15. *Яковлев В. А.* Оптимизация ступеней газовых турбин с использованием 3D моделей расчета течения / В. А. Яковлев, С. В. Ершов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестн. НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 33–40.

Поступила в редакцию
07.04.12