

БЛИНОВ Виталий Леонидович

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ РЕШЕТОК
ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ГТУ НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Турбины и двигатели»
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Бродов Юрий Миронович

Официальные оппоненты: **Рассохин Виктор Александрович**, доктор
технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический университет Петра
Великого», заведующий кафедрой «Турбины,
гидромашины и авиационные двигатели»;
Арбеков Александр Николаевич, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана», доцент кафедры
«Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное объединение по
исследованию и проектированию энергетического
оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-
Петербург

Защита состоится 26 июня 2015 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного
совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002,
г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Газотурбинные установки получили широкое распространение во многих отраслях промышленности: энергетике (выработка электроэнергии и теплоты), на транспорте (авиация и судовой транспорт), в технологических отраслях (химическая, нефтегазовая). Наряду с пополнением знаний по проектированию основных отсеков ГТУ, совершенствуются и методы проектирования осевых компрессоров (ОК). Так, одним из основных направлений в области совершенствования проточной части ОК является создание более экономичных и высоконапорных ступеней.

Проектирование лопаточного аппарата ОК заключается в определении формы профилей лопаток направляющих и рабочих венцов. Задача выбора профиля лопатки на каждом радиусе для заданной кинематики потока сводится к расчету ряда плоских компрессорных решеток, обеспечивающих требуемый угол поворота рабочего тела при минимальных потерях.

С развитием современных программных комплексов для численного решения уравнений Навье–Стокса появляется возможность проводить неограниченное количество численных экспериментов с достаточной точностью, заменяя тем самым дорогостоящие натурные испытания, а быстрый рост возможностей вычислительной техники позволяет сократить затраченные на это время и средства. Становится возможным в короткие сроки осуществлять подбор оптимальных вариантов профилей, удовлетворяющих повышенным требованиям как по эффективности, так и по уровню нагрузки ступеней ОК в широком диапазоне режимов работы, за счет применения методов вычислительной газовой динамики (Computational fluid dynamics – CFD) совместно с алгоритмами многокритериальной оптимизации.

Результаты указанного подхода могут использоваться для разработки принципов профилирования, что сводится к выбору наиболее оптимальной топологии профиля лопаток осевого компрессора с определением характерных коэффициентов и зависимостей геометрии профиля от параметров потока.

Это позволяет существенно сократить затраты и повысить эффективность процессов проектирования и модернизации лопаточного аппарата компрессора на соответствующих стадиях его жизненного цикла.

Актуальность работы, определяющая цели и задачи исследования, заключается в необходимости совершенствования стационарных и транспортных ГТУ, в том числе путем разработки и реализации мероприятий в области проектирования, доводки и модернизации проточной части ОК с применением современных программных комплексов.

Работа выполнена в соответствии с утвержденными на Федеральном уровне Приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники РФ (пункт 08 – Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) и Перечнем критических технологий РФ (пункт 27 – Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе).

Цель работы – разработка принципов параметрического профилирования плоских решеток осевых компрессоров ГТУ на основании результатов многокритериальной оптимизации. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- исследованы характерные особенности существующих методов профилирования и совершенствования плоских компрессорных решеток; определены рабочие диапазоны основных параметров ступеней ОК ГТУ;

- проведено расчетное исследование течения в межлопаточных каналах ОК с применением методов вычислительной газовой динамики и выполнена верификация построенных численных моделей;

- предложен и обоснован подход к параметрическому проектированию плоского профиля пера лопатки осевого компрессора;

- разработана и апробирована схема автоматической многокритериальной оптимизации плоской компрессорной решетки профилей и сформулированы практические рекомендации по выбору критериев, ограничений и переменных при оптимизации плоского профиля лопатки осевого компрессора на основании сравнительного анализа решенных задач в различной постановке;

– проведены оптимизационные исследования компрессорной решетки профилей в широком диапазоне параметров потока, на основании результатов которых получены семейства оптимальных профилей, с выявлением характерных зависимостей между геометрическими и аэродинамическими характеристиками решетки;

– предложен и апробирован алгоритм параметрического профилирования решеток осевых компрессоров при аэродинамическом совершенствовании проточной части ОК натурной ГТУ.

Научная новизна работы определяется тем, что:

- 1) предложен и физически обоснован новый подход к параметрическому проектированию (новая топология) плоского профиля пера лопатки осевого компрессора, адаптированный для решения задач оптимизации;
- 2) разработана и обоснована схема автоматической оптимизации; определены необходимые и достаточные критерии, ограничения и переменные при решении задач многокритериальной оптимизации плоского профиля лопатки осевого компрессора;
- 3) поставлена задача оптимизации и исследованы варианты формы профиля при независимом задании его кривизны со стороны сжатия и разряжения;
- 4) предложено семейство оптимальных профилей для различных параметров потока. Описан алгоритм выбора параметров искомого профиля на основании полученного семейства;
- 5) получены аналитические зависимости определяющих параметров профиля в соответствии с предложенной топологией от требуемого угла поворота потока в широком диапазоне значений числа Маха, плотности решетки и максимальной толщины профиля.

Достоверность и обоснованность результатов определяется:

– использованием в процессе выполнения работы наиболее современных апробированных и научно обоснованных программ, методик численного трехмерного расчета течений в лопаточных аппаратах турбомашин и программных комплексов многокритериальной оптимизации;

- хорошим совпадением экспериментальных данных с результатами численного моделирования течения в межлопаточном канале ОК;
- совпадением части полученных результатов с опытными данными и теоретическими представлениями других авторов по теме исследования;
- промышленной апробацией разработанных принципов при проектировании направляющего аппарата осевого компрессора натурной ГТУ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- 1) разработан автоматизированный алгоритм построения параметрической модели профиля пера лопатки ОК ГТУ на основании предложенной топологии;
- 2) разработан автоматизированный алгоритм аппроксимации существующих профилей в целях построения их параметризованной модели согласно предложенной топологии;
- 3) представлены рекомендации по постановке задачи многокритериальной оптимизации плоской компрессорной решетки, которые могут быть использованы в инженерной практике при доводке и модернизации ОК ГТУ;
- 4) получено семейство оптимальных профилей с известными характеристиками для различных параметров потока, пригодных к использованию при проектировании новых компрессоров;
- 5) предложены и апробированы мероприятия по аэродинамическому совершенствованию лопаточного аппарата ОК натурной ГТУ стационарного типа.

Реализация результатов работы. Результаты, представленные в работе, использованы при разработке новой конструкции направляющего аппарата ступени осевого компрессора натурной ГТУ, которая эксплуатируется в ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Ряд полученных результатов используется в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в учебном процессе при подготовке специалистов, бакалавров и магистров по

направлению «Энергетическое машиностроение», по профилю «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели».

Автор защищает:

- 1) специальный способ параметрического описания геометрии (топологию) профиля лопатки ОК для решения задач оптимизации и его физическое обоснование;
- 2) автоматизированный алгоритм (программный код) профилирования лопатки на основании предложенной топологии профиля; автоматизированный алгоритм аппроксимации исходного профиля произвольной геометрии согласно разработанной топологии;
- 3) схему автоматической многокритериальной оптимизации лопаточного аппарата ОК ГТУ с использованием разработанных алгоритмов и современных программных комплексов;
- 4) результаты решения задач многокритериальной оптимизации профиля пера лопатки осевого компрессора и предложенные на основании их анализа принципы параметрического профилирования;
- 5) результаты апробации данных исследования при совершенствовании ОК натурной ГТУ.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2012 г.); XXXXII Всероссийском симпозиуме по механике и процессам управления (Миасс, 2012 г.); LX научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы проектирования и эксплуатации наземных объектов с газотурбинными и парогазовыми установками» (Казань, 2013 г., диплом второй степени V конкурса молодых научных сотрудников и конструкторов); Международной научно-практической конференции Energy Quest 2014 «Energy Production and Management in the 21st Century» (Екатеринбург, 2014 г.); XV Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и

инновации» (Пермь, 2014 г.); 59-й Международной ежегодной технической конференции и выставке по газовым турбинам ASME Turbo Expo 2014 (Dusseldorf, Germany, 2014 г.); IX Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Миасс, 2014 г.); LXI научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научные и практические проблемы использования достижений авиадвигателестроения в наземных ГТУ» (Пермь, 2014 г.).

Публикации. Основные положения и выводы изложены в 12 печатных работах, в том числе *в четырех публикациях в научных журналах, которые включены в перечень рецензируемых научных изданий, определенный ВАК*, и в одной публикации в научном сборнике, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании поставленных целей и задач исследования; в разработке топологии профиля лопатки осевого компрессора и программных кодов на ее основе, постановке и проведении расчетных и оптимизационных исследований, направленных на выполнение поставленных задач; в обработке и анализе полученных данных, непосредственном участии в апробации результатов исследований и испытаниях усовершенствованного ОК натурной ГТУ; в разработке рекомендаций для инженерной практики по аэродинамическому совершенствованию ступеней ОК ГТУ; в подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объем диссертации. Квалификационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и приложения. Весь материал изложен на 167 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

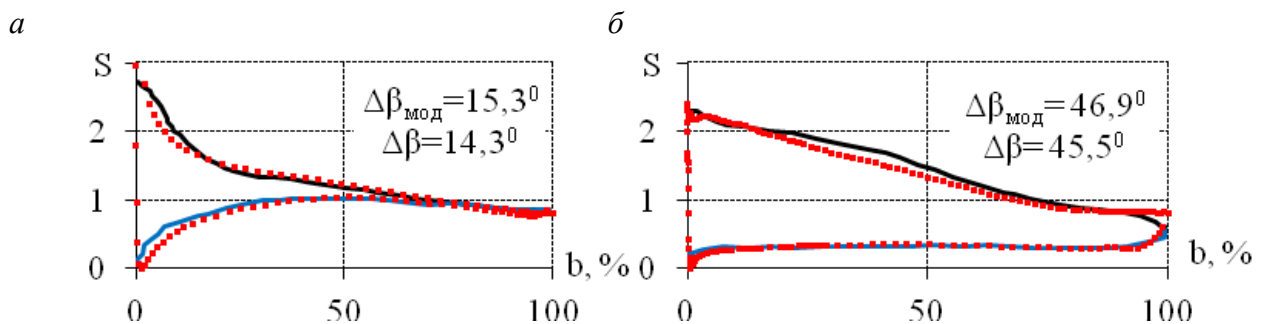
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и

практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые положения.

В **первой главе** представлен аналитический обзор научно-технической информации по теме исследования; проведен анализ характеристик ступеней осевых компрессоров ГТУ и выявлены направления их дальнейшего совершенствования; проанализированы существующие подходы к профилированию плоских компрессорных решеток; рассмотрены вопросы постановки численного исследования течения в проточной части осевого компрессора и принципы решения задач многокритериальной оптимизации.

Исходя из проведенного анализа литературных данных с учетом поставленной цели сформулированы основные задачи исследования.

Во **второй главе** проведено численное исследование течения в компрессорной решетке профилей в широком диапазоне изменения значений числа Маха, а также исследование течения в ступени и проточной части ОК в целом. Представлено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными продувок решеток профилей серии NASA 65 (Рисунок 1) и профилей 10A40/15П45 (Рисунок 2). Выполнена верификация численных моделей ступени ОК на примере дозвуковой ступени К-50-1 и трансзвуковой Stage 35. Представлены результаты испытаний осевого компрессора натурной ГТУ, построена расчетная модель его проточной части и проведено численное исследование течения в нем. Приведены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных.



Маркеры – результаты моделирования (k - ε , 100 000 ячеек);
сплошные линии – экспериментальные данные

Рисунок 1 – Распределение коэффициента давления вдоль профилей NASA 65-010 при $b/t = 1$, $\beta_1 = 30^\circ$, $\alpha_1 = 17^\circ$ (а) и NASA 65-(27)10 при $b/t = 1$, $\beta_1 = 45^\circ$, $\alpha_1 = 33^\circ$ (б)

Установлено, что при низком значении скорости потока ($M < 0,4$) все расчетные модели компрессорной решетки хорошо согласуются с экспериментальными данными. При больших дозвуковых значениях числа Маха модели прогнозируют завышенный диапазон устойчивой работы решетки; хорошее совпадение результатов моделирования получено в диапазоне углов атаки от -5 до $+5$ градусов.



Рисунок 2 – Зависимость изменения коэффициента потерь полного давления от угла атаки по результатам натурного и численного (SST GTM, 1 500 000 ячеек) экспериментов продувки решетки из профилей 10А40/15П45 при числе Маха 0,6

На основании полученных данных предложены рекомендации по выбору модели турбулентности, параметров расчетной сетки и по заданию граничных условий при решении задачи многокритериальной оптимизации формы профиля лопатки ОК.

В **третьей главе** представлена разработанная автором топология профиля пера лопатки (Рисунок 3) и приводится ее физическое обоснование. Под топологией профиля в работе понимаются принципы параметрического описания геометрической формы профиля, наилучшим образом позволяющие осуществлять его дальнейшую оптимизацию. Разработаны, представлены и апробированы автоматизированный алгоритм профилирования лопатки и автоматизированный алгоритм аппроксимации любого профиля произвольной формы на основании предложенной топологии.

В разработанной топологии спинка профиля описывается кривой Безье третьего порядка, корытце – кривой Безье четвертого порядка, что обусловлено стремлением добиться «гибкого» изменения формы профиля; входная и выходная

кромки задаются дугами окружностей. Математическое параметрическое представление кривой Безье имеет вид

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

где B_i – это i -я вершина многоугольника Безье; J_n – это базис Безье (базис Бернштейна или функция аппроксимации), который вычисляется как

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}. \quad (2)$$

Здесь $J_{n,i}(t)$ – это i -я функция базиса Бернштейна порядка n , где n – порядок определяющей функции базиса Бернштейна и, следовательно, сегмента полиномиальной кривой. Значение n на единицу меньше количества точек определяющего многоугольника.

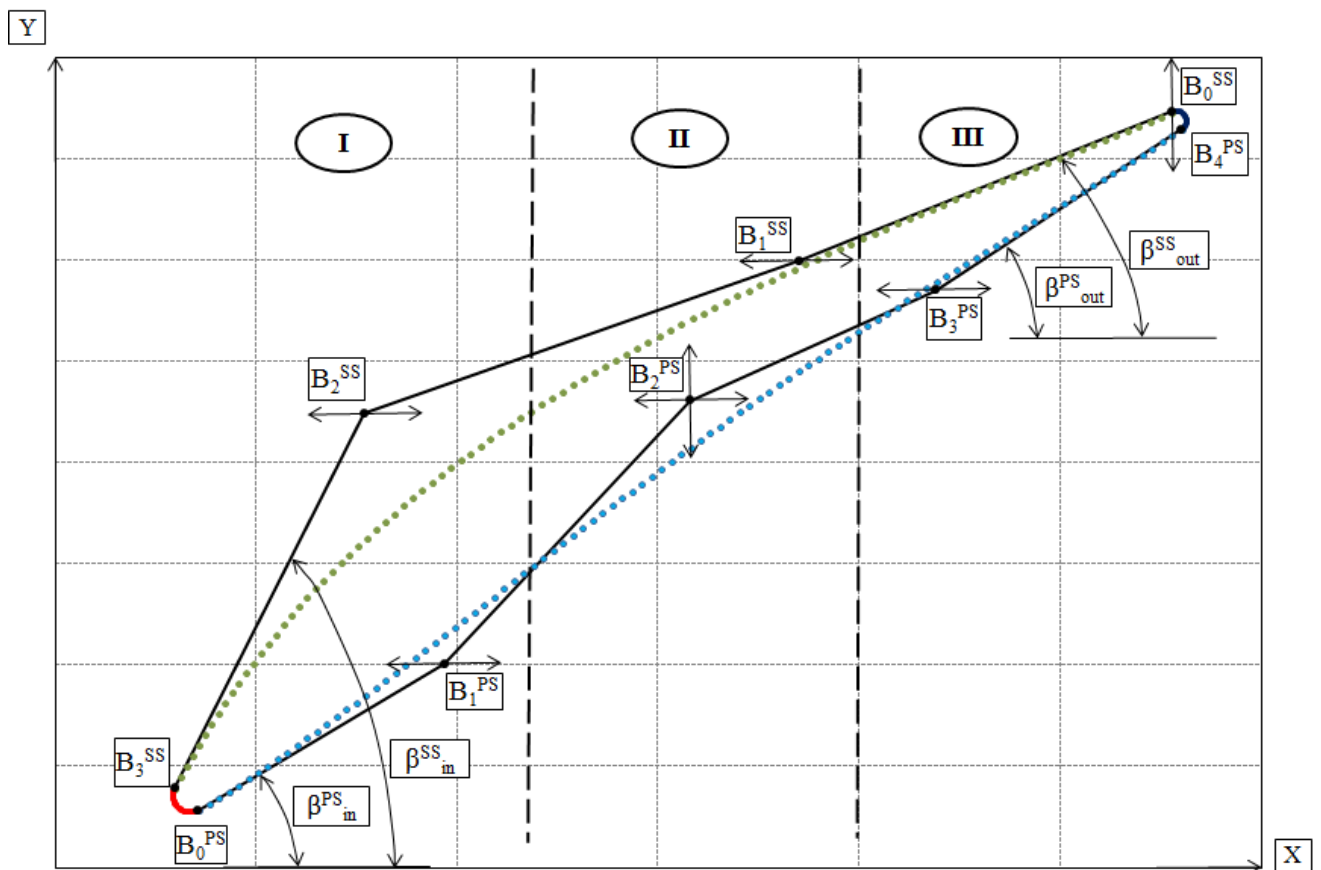


Рисунок 3 – Параметрическая модель профиля пера лопатки

На рисунке 3 показаны направления перемещения вершин и изменение углов граней многоугольника Безье в процессе оптимизации формы профиля.

На спинке профиля координаты точки B_3^{SS} и абсцисса точки B_0^{SS} зафиксированы. Координаты точек перехода линии корытца во входную и выходную кромки профиля (B_0^{PS} и B_4^{PS}) и радиусы кромок определяются исходя из условия непрерывности первой производной в этих точках. Таким образом, крайние по профилю грани многоугольника Безье касательны к дугам окружностей входной и выходной кромки. Для получения новой формы профиля варьируются следующие параметры: абсциссы точек B_1^{SS} , B_2^{SS} , B_1^{PS} , B_2^{PS} , B_3^{PS} , ординаты точек B_0^{SS} и B_2^{PS} , лопаточные углы входа и выхода потока со стороны спинки и корытца профиля – β_{in}^{SS} , β_{in}^{PS} , β_{out}^{SS} , β_{out}^{PS} . Так в процессе оптимизации используется 11 переменных, зная которые можно вычислить координаты любой точки на профиле по представленному в работе алгоритму.

Для физического обоснования представленной топологии профиль лопатки условно разделен на три участка (римские цифры на рисунке 3). На первом участке лопаточный угол β_{in}^{SS} может использоваться для контроля и адаптации профиля к углам атаки в корытце. Перемещение точки B_2^{SS} в осевом направлении позволяет контролировать длину и кривизну участка на спинке профиля со стороны входной кромки, что влияет на структуру пограничного слоя на данном участке (положение точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный). При выборе угла выхода потока со спинки профиля β_{out}^{SS} и положения абсциссы точки B_1^{SS} изменяется кривизна участков II и III со стороны спинки, что определяет уровень нагрузки на данную область. Таким образом, изменяя перечисленные параметры, можно добиться оптимального распределения скоростей потока вдоль спинки профиля.

На первом участке изменение геометрического угла входа на корытце профиля β_{in}^{PS} и абсциссы точки B_1^{PS} сказывается на характеристиках профиля при повышенном расходе в ступени. Также размер этого участка влияет на величину горла межлопаточного канала. Перемещение точки B_2^{PS} на участке II позволяет получать профили с двумя утолщениями (у которых максимальная толщина достигается в двух местах: на расстоянии 30–40 % и 65–70 % по хорде профиля).

Форма участка III на корытце зависит от угла $\beta_{\text{out}}^{\text{PS}}$ и абсциссы точки B_3^{PS} . Изменяя геометрические параметры данного участка, можно повысить угол выхода потока из венца.

Отличительная особенность предложенного подхода заключается в том, что формирование профиля происходит без прямого изменения его средней линии и распределения толщины вдоль нее, а для исключения недопустимо тонких вариантов профилей накладываются ограничения на его максимальную и минимальную толщину. Одним из преимуществ разработанной топологии является наличие возможности локального изменения формы спинки и корытца: изменяя заданные переменные, можно получить любую форму профиля. Важно, что полученный по результатам проектирования профиль построен с учетом современных представлений о характере течения в диффузорном межлопаточном канале, а переменные оптимизации обеспечивают учет конкретных условий обтекания и назначения создаваемого профиля.

В четвертой главе приведено описание разработанной схемы автоматической многокритериальной оптимизации формы профиля лопатки (в соответствии с рисунком 4) и обоснование выбора критериев, переменных и накладываемых ограничений. Представлен сравнительный анализ применения разных подходов к параметрическому описанию профиля лопатки при решении одной оптимизационной задачи. Проведено сопоставление вариантов постановок задачи многорежимной многокритериальной оптимизации. На основании анализа полученных результатов разработаны практические рекомендации для инженерной практики по решению задач оптимизации формы профилей лопаток.

Основными этапами цикла оптимизации являются: построение профиля лопатки по заданным параметрам, численное исследование течения в компрессорной решетке из полученных профилей и анализ результатов расчетов с формированием задания на следующий цикл. Геометрическая модель профиля пера лопатки из разработанного модуля профилирования передавалась в программный комплекс Ansys CFX, в котором осуществлялось сеточное

разбиение расчетной области и численное исследование течения. Анализ полученных данных и принятие решения о дальнейшем изменении формы профиля, на основании которого по разработанному алгоритму профилирования создавался новый файл с геометрией лопатки, проводились с помощью программы многокритериальной оптимизации IOSO, тем самым замыкая цикл оптимизации.

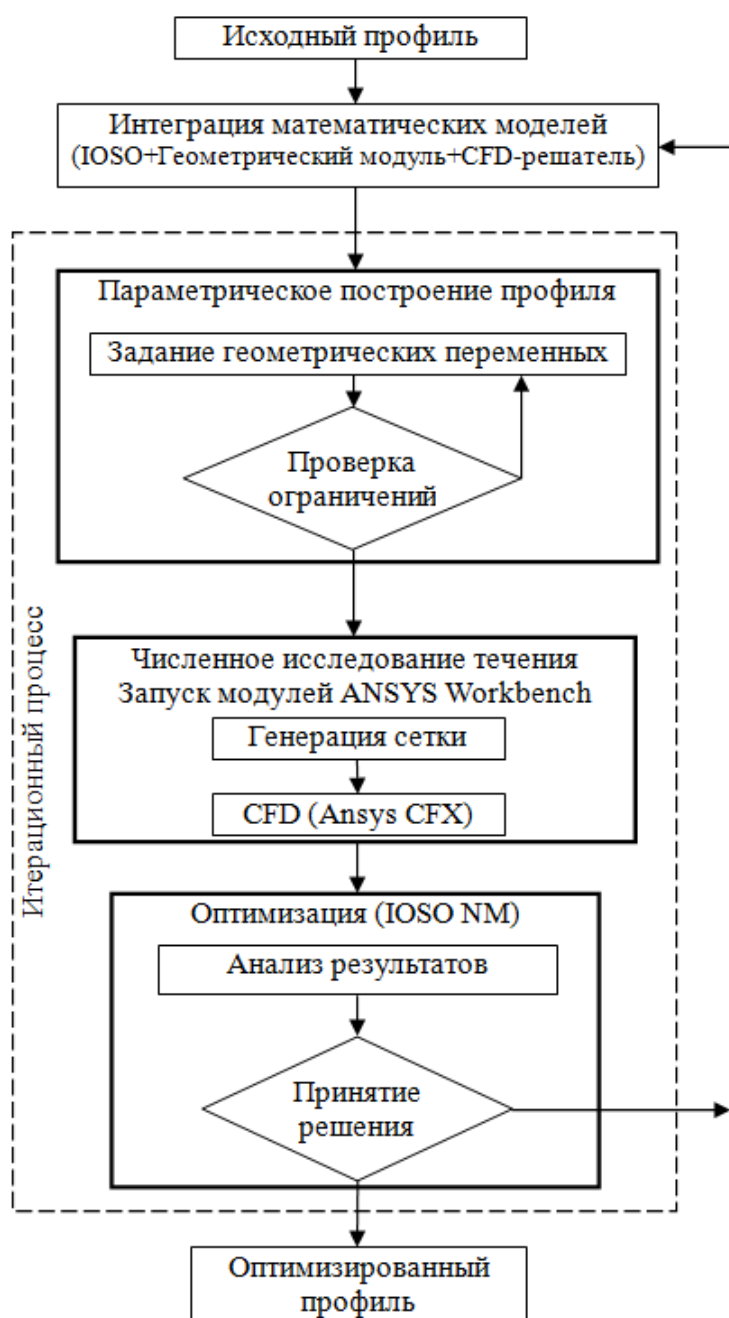


Рисунок 4 – Схема автоматической оптимизации

В качестве критериев оптимизации выбраны максимизация угла поворота потока в межлопаточном канале и минимизация коэффициента потерь полного давления. В процессе оптимизации накладывались ограничения на максимальную и минимальную толщину профиля, на угол отставания потока, на погрешность по расходу на входе и выходе из расчетного домена. Оптимизация осуществлялась одновременно на двух режимах работы компрессорной решетки, что обеспечило получение профилей, работающих в широком диапазоне углов атаки.

Показана эффективность разработанной схемы оптимизации на примере задачи

аэродинамического совершенствования широко известных профилей серии NASA 65. На рисунке 5 представлены характеристики компрессорных решеток из

оптимизированных профилей при различных постановках задачи и характеристики решетки профилей NASA 65. Полученные профили имеют более широкий диапазон работы при относительно более низких потерях полного давления.

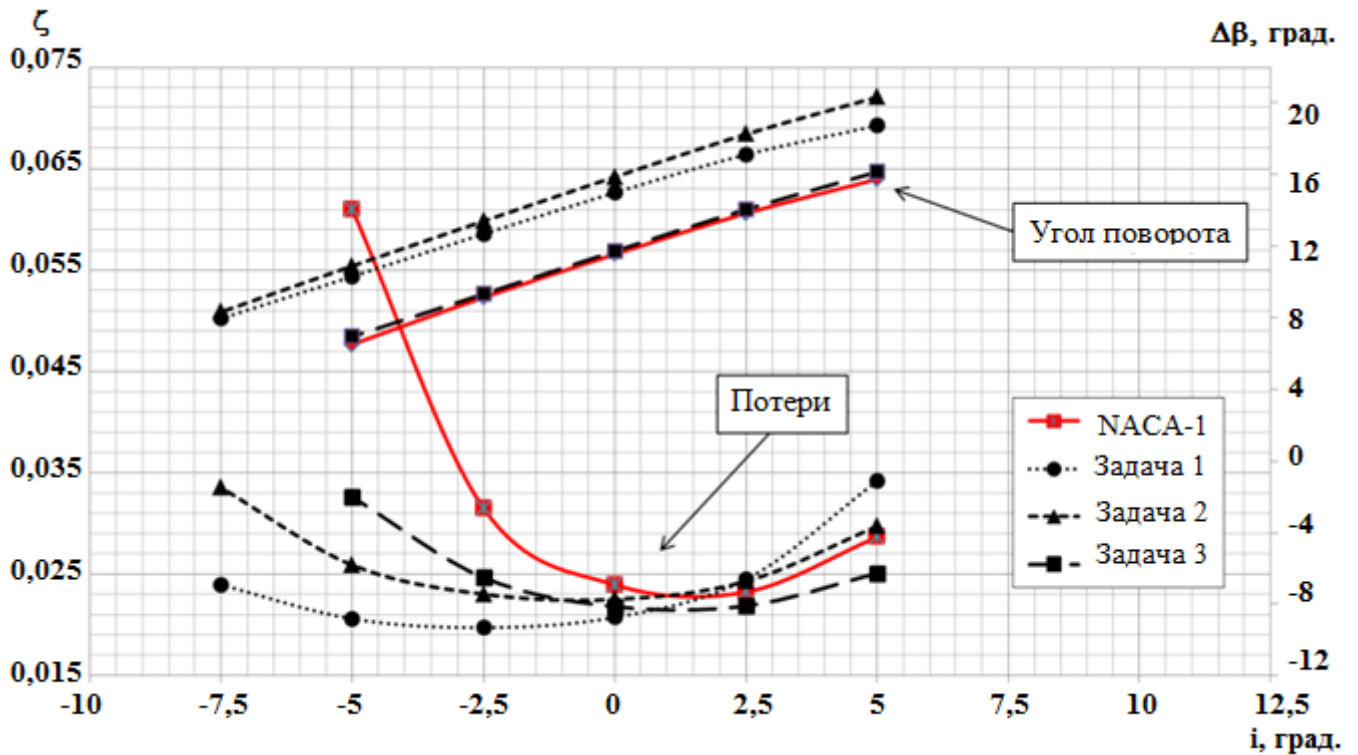


Рисунок 5 – Характеристики решеток из оптимизированных профилей на близкий угол поворота потока при разных постановках задачи

Предложенный подход к автоматической многокритериальной оптимизации может быть использован как при решении частных задач совершенствования лопаточного аппарата осевых компрессоров, так и для выявления ключевых зависимостей между геометрическими и аэродинамическими характеристиками решетки оптимальных профилей в широком диапазоне параметров потока с последующей разработкой на их основе принципов параметрического профилирования.

В **пятой главе** представлены результаты двухрежимной оптимизации профиля лопатки ОК при различных значениях числа Маха и параметров решетки. Проведен анализ геометрии профилей, полученных в ходе оптимизации, и представлены зависимости основных геометрических переменных профиля от требуемого угла поворота потока. Получены семейства оптимальных профилей,

которые могут использоваться при проектировании лопаточного аппарата ОК. На основании полученных результатов выработаны рекомендации по профилированию ступеней осевых компрессоров. Представлен пример формирования лопатки из полученных профилей и проведена апробация результатов исследования на осевом компрессоре ГТУ типа ГТК-10-4, линия рабочих режимов которого приближается к границе газодинамической устойчивости при близких к номинальному значениям приведенной частоты вращения ротора.

Полученный по результатам решения задачи оптимизации при $M_l = 0,8$, $b/t = 1,2$ и $C_{отн} = 7\%$ Парето фронт представлен на рисунке 6. Исходный профиль характеризуется углами поворота потока $12,7^\circ$ и $12,9^\circ$ и коэффициентами потерь полного давления $0,106$ и $0,031$ на первом и втором режиме работы решетки соответственно. В процессе оптимизации удалось повысить угол поворота потока более чем на 20° . Всего решено более 20 задач оптимизации при различных значениях числа Маха ($0,4-0,8$), густоты решетки ($1-2,2$) и относительной толщины профиля ($7-14\%$). Парето фронт каждой задачи строился по результатам более 2000 вызовов CFD-решателя. Для аппроксимации зависимостей геометрических переменных профиля от параметров потока использовались данные более 500 оптимальных профилей.

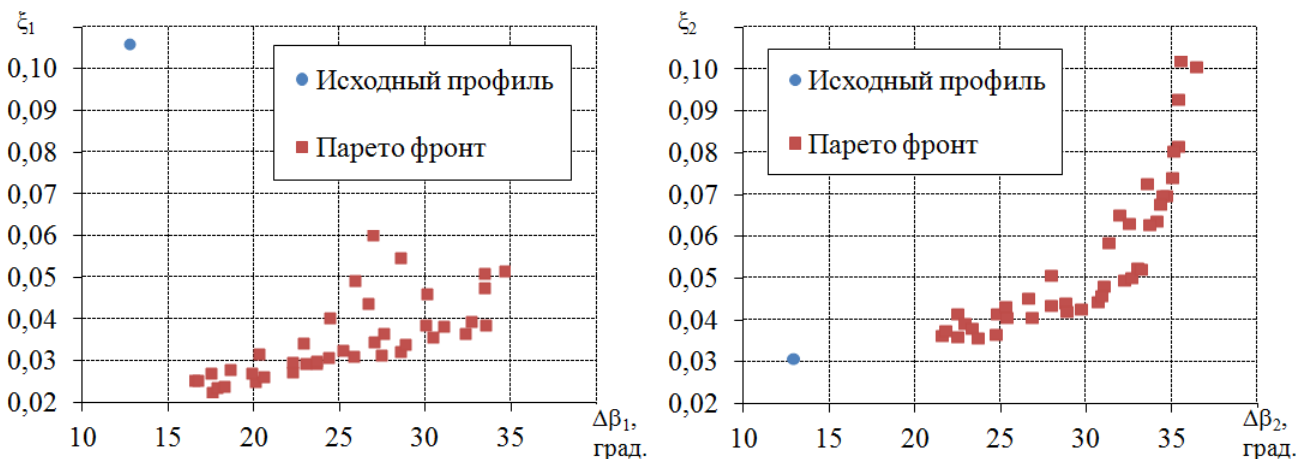


Рисунок 6 – Парето фронт задачи оптимизации при $M_l = 0,8$, $b/t = 1,2$ и $C_{отн} = 7\%$ на двух режимах работы решетки

Пример типовых оптимальных профилей, полученных при решении оптимизационных задач, для значений числа Маха на входе в решетку $0,6$ и $0,8$

представлен на рисунке 7. Максимальный поворот потока при малых значениях числа Маха (до 0,6) достигается на спинке вблизи входной кромки на расстоянии 10–20 % по хорде профиля. С увеличением числа Маха (0,6 и более) максимальная изогнутость и, следовательно, пик скорости смещаются в сторону середины профиля на расстояние 30–40 % по хорде. Полученный характер распределения параметров потока вдоль профиля при $M_1 = 0,6$ свойственен профилям с предписанным распределением скорости. При $M_1 = 0,8$ получены профили S-образной формы, отличительной особенностью которых является наличие двух пиков скорости на спинке профиля (на расстоянии 30–40 % и 55–65 % по хорде) и пика скорости на корытце профиля (на расстоянии 10 % по длине хорды профиля).

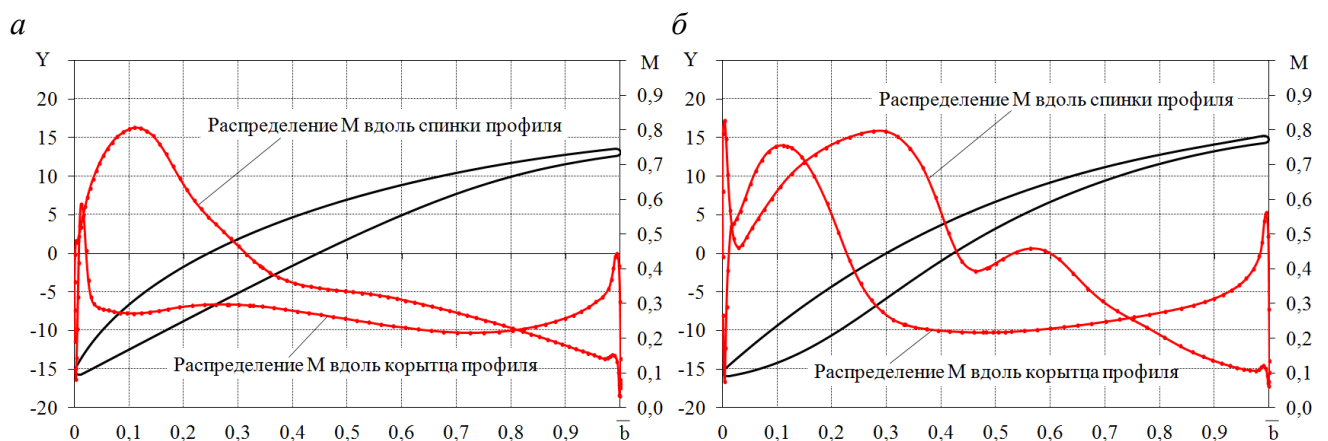


Рисунок 7 – Форма профиля и распределение числа Маха вдоль оптимизированного профиля при $M_1 = 0,6$ (а) и $M_1 = 0,8$ (б)

Проведены натурные испытания осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4 в составе газоперекачивающего агрегата ст. № 37 Пангодинского линейно-производственного управления ООО «Газпром трансгаз Югорск». В ходе испытаний осуществлялось измерение полного набора параметров, позволяющих определить мощность, характеристики отдельных элементов: компрессора, турбины, регенераторов. Были организованы специальные измерения: давления и температуры над четвертой ступенью для оценки распределения давления по группам ступеней компрессора; пульсаций давления над рабочим колесом девятой ступени для оценки газодинамической устойчивости компрессора при близких к номинальному значениям частотах вращения; расхода воздуха на входе

в осевой компрессор. Испытания проводились в максимально широком диапазоне рабочих режимов компрессора. ГТУ выводилась на минимальный с точки зрения работы в газотранспортной сети режим. Затем проводилось постепенное повышение частоты вращения до достижения максимальной нагрузки.

Анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования течения в проточной части осевого компрессора подтвердил наличие проблем с обтеканием лопаточного аппарата четвертой ступени. Данные проблемы вызваны аэродинамической несогласованностью работы входной (1–4 ступени) и выходной (5–10 ступени) группы ступеней. Поэтому для согласования работы всего компрессора в широком диапазоне режимов наиболее простым подходом, с точки зрения практической реализации, является доработка четвертой ступени и в частности ее направляющего аппарата.

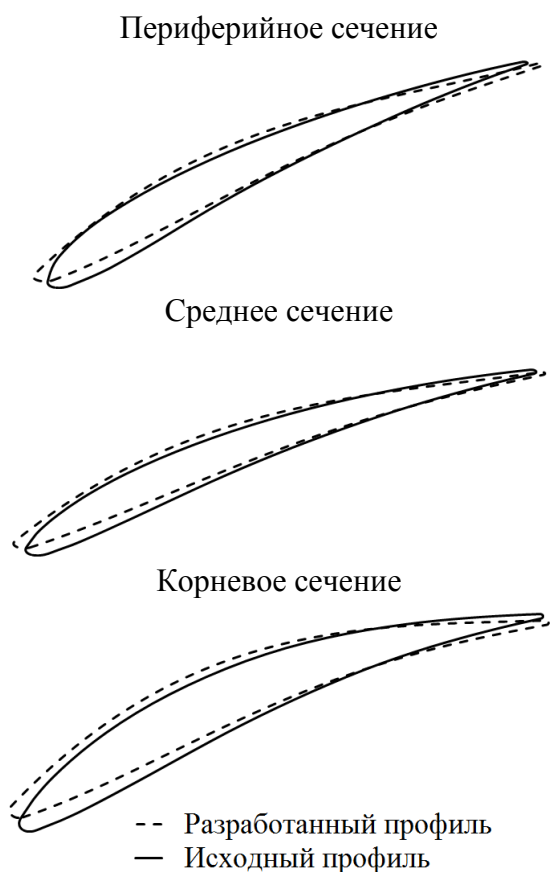


Рисунок 8 – Сравнение форм профилей исходной и разработанной лопатки по сечениям

Результаты численного исследования течения в ОК с разработанным лопаточным аппаратом (Рисунок 8) показали снижение интенсивности отрывных явлений в проточной части компрессора в широком диапазоне режимов его работы, что говорит об улучшении согласования входной и выходной группы ступеней. Спрофилированный по разработанному алгоритму комплект направляющих лопаток четвертой ступени был изготовлен, установлен и испытан на натурной ГТУ. Анализ результатов испытаний натурального осевого компрессора с измененным лопаточным аппаратом подтвердил эффективность предложенного решения.

На рисунке 9 представлены линии рабочих режимов ОК ГТУ типа ГТК-10-4 до и после внесения изменений в лопаточный аппарат компрессора, полученные на основании обработки результатов испытаний.

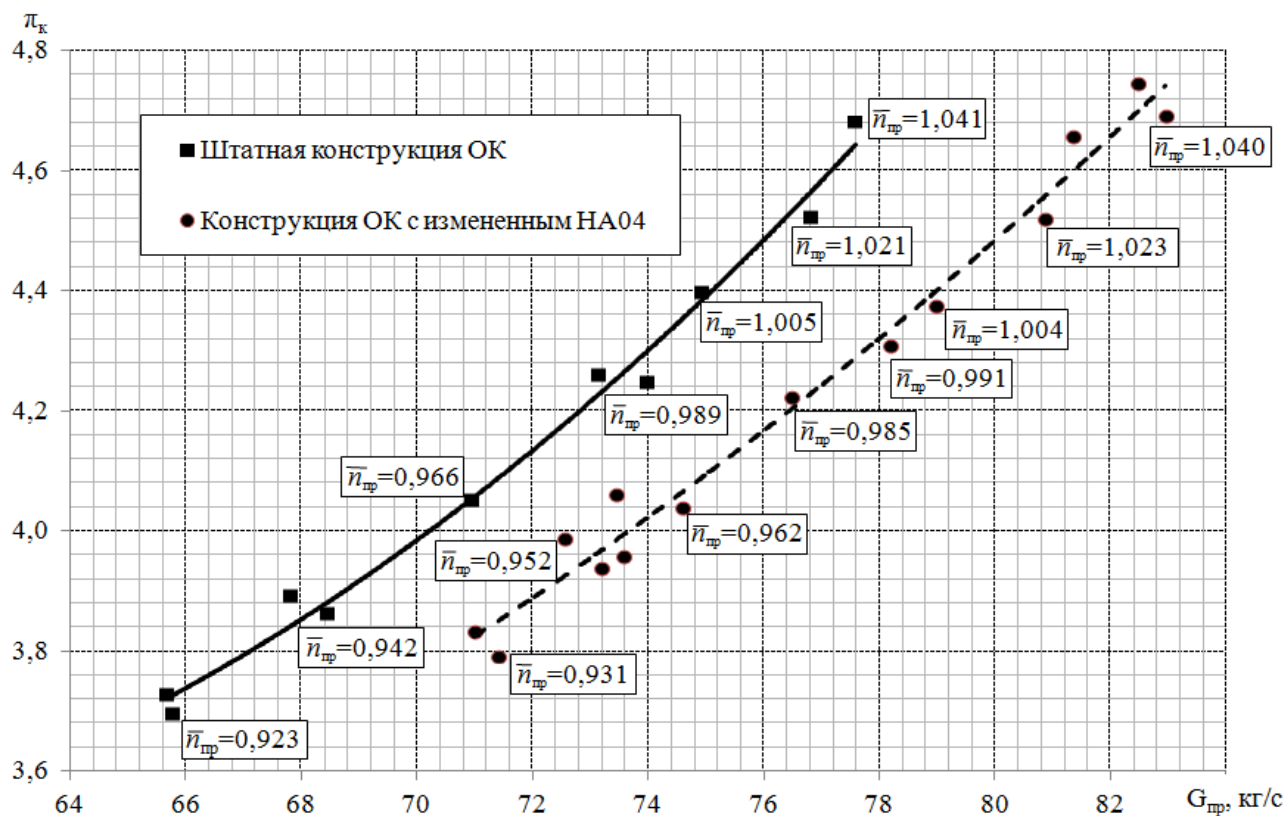


Рисунок 9 – Линии рабочих режимов ОК ГТУ типа ГТК-10-4 по данным натурных испытаний

Для ОК с измененным лопаточным аппаратом линия рабочих режимов проходит в области больших расходов при той же приведенной частоте вращения ротора, что позволяет судить об увеличении диапазона устойчивой работы компрессора. Это можно объяснить следующим: за счет изменения характеристики направляющего аппарата четвертой ступени минимизированы потери энергии в широком диапазоне углов атаки (режимов работы) при значительном снижении отрывных течений в проточной части, в результате удалось достичь перераспределения работы сжатия между ступенями при сохранении суммарной степени повышения давления и смещении линии рабочих режимов вправо. За счет предложенных мер удалось повысить расход воздуха через ОК на 3–5 % в диапазоне значений относительной приведенной частоты вращения ротора компрессора 0,92–1,04.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена и апробирована топология профиля пера лопатки ОК ГТУ, предназначенная для эффективного решения задачи многокритериальной оптимизации и выявления характерных зависимостей геометрических параметров профиля и аэродинамических характеристик компрессорной решетки. Представлено физическое обоснование разработанного способа параметрического описания профиля лопатки, на основании которого показана целесообразность выбора 11 переменных оптимизации. В работе введено понятие «топология профиля», под которым понимаются принципы параметрического описания геометрической формы профиля, наилучшим образом позволяющие осуществлять его дальнейшую оптимизацию.

2. Разработан автоматизированный алгоритм профилирования лопатки, на основании которого написан программный код на языке программирования VBA для создания файла с геометрией лопатки, пригодного для интеграции в ПК Ansys. Разработан автоматизированный алгоритм аппроксимации любого профиля произвольной формы согласно предложенной топологии, предназначенный для определения исходных геометрических переменных параметрической модели и последующего внедрения данного профиля в алгоритм профилирования и дальнейшей оптимизации его формы.

3. Предложена и обоснована схема автоматической многокритериальной оптимизации формы профиля лопатки ОК ГТУ, обеспечивающая совместную работу ПК IOSO, Ansys и разработанного модуля профилирования. Подтверждена эффективность разработанной топологии профиля. Предложен и обоснован выбор критериев и ограничений оптимизации. Установлено, что наилучшие результаты при наименьшем числе циклов оптимизации с точки зрения получения семейства оптимальных профилей в широком диапазоне углов поворота потока достигаются при использовании в качестве целевых функций потерь полного давления на двух режимах работы решетки и угла поворота потока на режиме с углом атаки в корытце профиля.

4. Получены семейства оптимальных профилей в исследуемом диапазоне параметров. Для этого поставлены и решены задачи многокритериальной оптимизации формы профиля при различных значениях числа Маха (0,4–0,8), густоты решетки (1–2,2) и относительной толщины профиля (7–14 %). Установлено, что полученные в результате оптимизации профили ОК по своим характеристикам, а также принципу распределения ключевых параметров соответствуют ведущим мировым аналогам, при этом по результатам работы все профили имеют параметрическое описание. Проведен анализ оптимизированных профилей, на основании которого установлены зависимости изменения геометрических параметров оптимального профиля (переменных оптимизации) при изменении угла поворота потока.

5. Реализован и апробирован алгоритм практического использования принципов профилирования, разработанный на основании результатов решения задач многокритериальной оптимизации. С использованием представленного алгоритма и полученных семейств оптимальных профилей выполнено профилирование лопатки направляющего аппарата четвертой ступени осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4. Проведено численное исследование течения в осевом компрессоре с перепрофилированным лопаточным аппаратом и показано преимущество предложенного варианта. Изготовлен опытный образец направляющего аппарата и проведены натурные испытания, анализ результатов которых подтвердил положительный эффект, а следовательно, применимость и перспективность разработанного подхода к профилированию. Удалось обеспечить устойчивую работу ОК в диапазоне значений относительной приведенной частоты вращения ротора 0,92–1,04 с повышением расхода воздуха через компрессор на 3–5 %.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Блинов, В. Л. Аэродинамическое совершенствование направляющей лопатки последней ступени осевого компрессора с целью снижения закрутки потока на выходе / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. А. Ращепкин // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 7. – С. 43–46 (0,35 п.л./0,25 п.л.).

2. Блинов, В. Л. Расчетное исследование влияния аэроупругости на прочностные характеристики рабочей лопатки осевого компрессора приводной ГТУ / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. А. Ращепкин // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 24–27 (0,35 п.л./0,1 п.л.).

3. Блинов, В. Л. Опыт разработки и реализации мер по аэродинамическому совершенствованию осевого компрессора стационарной ГТУ / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. В. Скороходов, А. О. Прокопец // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5-6. – С. 101–111 (0,95 п.л./0,25 п.л.).

4. Blinov, V. L. The application of modern Computational Fluid Dynamics techniques for increasing the efficiency and stability of an axial compressor in an industrial gas turbine / V. A. Sedunin, O. V. Komarov, V. L. Blinov, A. V. Skorokhodov, A. O. Procopets // Energy Production and Management in the 21st Century – 2 Volume Set. The Quest for Sustainable Energy. Edited By: C. A. Brebbia, E. R. Magaril, M. Y. Khodorovsky. WIT Transactions on Ecology and the Environment. – Series Volume 190, 2014. – P. 707–719 (0,9 п.л./0,25 п.л.).

5. Блинов, В. Л. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток / В. Л. Блинов, Ю. М. Бродов, В. А. Седунин, О. В. Комаров // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 1. – С. 36–42 (0,65 п.л./0,45 п.л.).

Работы по теме диссертации, опубликованные в других изданиях:

6. Блинов, В. Л. Расчетное исследование и анализ работы осевого компрессора установки ГТК10-4 в программном комплексе ANSYS CFX / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7и частях. 29 ноября – 2 декабря 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – Ч. 4. – С. 7–10 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

7. Блинов, В. Л. Повышение газодинамической устойчивости и экономичности осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4 средствами вычислительной газовой динамики / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. О. Прокопец // Материалы XXXXII Всероссийского симпозиума, 18–20 декабря 2012 г., Миасс. – М. : РАН, 2012. – Т. 4. Механика и процессы управления. – С. 100–108 (0,6 п.л./0,3 п.л.).

8. Блинов, В. Л. Результаты испытаний осевого компрессора с измененным лопаточным аппаратом / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. В. Скороходов // LX научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы проектирования и эксплуатации наземных объектов с газотурбинными и парогазовыми установками» : тезисы докладов, г. Казань, 24–26 сентября 2013 г., ОАО «ВТИ». Казань, 2013. – С. 78–80 (0,15 п.л./0,05 п.л.).

9. Блинов, В. Л. Оптимизация направляющего аппарата осевого компрессора / В. Л. Блинов // LX научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы проектирования и эксплуатации наземных объектов с газотурбинными и парогазовыми установками» : тезисы докладов, г. Казань, 24–26 сентября 2013 г., ОАО «ВТИ». Казань, 2013. – С. 200–208 (0,35 п.л./0,35 п.л.).

10. Blinov, V. L. Application of optimisation techniques for new high-turning axial compressor profile topology design / O. V. Komarov, V. A. Sedunin, V. L. Blinov // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany, GT2014-25379. – P. 1–9 (0,9 п.л./0,4 п.л.).

11. Блинов, В. Л. Разработка подхода к оптимизации лопаточного аппарата осевого компрессора / В. Л. Блинов, В. А. Седунин, О. В. Комаров // LXI научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научные и практические проблемы использования достижений авиадвигателестроения в наземных ГТУ» : тезисы докладов, г. Пермь, 8–11 сентября 2014 г. ОАО «ВТИ», 2014. – С. 141–146 (0,35 п.л./0,3 п.л.).

12. Блинов, В. Л. Моделирование продувок плоских компрессорных решеток профилей при низких числах Маха / Ю. М. Бродов, О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, С. А. Серков // Материалы IX международного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. – М. : РАН, 2014. – Т. 1. Фундаментальные и прикладные проблемы науки. – С. 86–92 (0,35 п.л./0,25 п.л.).

Подписано в печать 23.04.2015г.

Бумага писчая.

Уч.-изд. л. 1,0.

Плоская печать.

Тираж 100 экз.

Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 1,4.

Заказ .

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19