

На правах рукописи

Коршунов Андрей Васильевич

МЕТОД ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК ОБРАТНОНАПРАВЛЯЮЩЕГО
АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ
СПЛАЙН ФУНКЦИЙ

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена на кафедре “Компрессорная, вакуумная и холодильная техника” Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель:

профессор, доктор технических наук

Стрижак Леонид Яковлевич

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук Жарковский Александр Аркадьевич;

кандидат технических наук Данилов Кирилл Анатольевич.

Ведущая организация:

ЗАО «Институт энергетического машиностроения и электротехники», Санкт-Петербург

Защита состоится “26” мая 2009 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ауд. 225 главного здания).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан « 21 » апреля 2009г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.09

д.т.н., профессор

Хрусталёв Б. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к увеличению использования центробежных компрессоров высокого давления (ЦКВД) для нужд химической, нефтяной, газовой, добывающей и перерабатывающей промышленности, так как эти компрессоры имеют ряд преимуществ по сравнению с поршневыми компрессорами. К этим преимуществам относятся равномерность нагнетания, отсутствие загрязнения маслом сжимаемой среды, лучшие массогабаритные показатели, более высокая надежность.

Основными областями применения ЦКВД являются: закачка природного газа в подземные хранилища; закачка попутного нефтяного газа в пласт, что позволяет поддерживать внутрислоевого давления и обеспечивает повышение выработки месторождения в среднем на 20-40%; технологические линии для производства аммиака, метанола, мочевины, полиэтилена.

В настоящее время наряду с ростом потребности в ЦКВД в промышленности существует тенденция к повышению единичной мощности турбоагрегатов, что позволяет увеличить производительность технологических процессов, использующих оборудование высокого давления, при одновременном снижении себестоимости продукта. Увеличение энергоемкости агрегатов приводит к необходимости проведения комплекса научно-исследовательских работ в области аэродинамики проточной части, разработки концевых уплотнений, динамики роторов, прочности элементов конструкций для того, чтобы добиться максимальной эффективности в возможно большем диапазоне рабочих условий, повышая тем самым рентабельность использования оборудования для собственных нужд и конкурентоспособность на мировом рынке.

Трудоемкость экспериментальных исследований, требующих уникального оборудования, требует создания надежных расчетно-теоретических методов, позволяющих определить оптимальную геометрию проточной части и

предсказывать поведение агрегата в целом при изменяющихся условиях работы и регулировании.

Обратнонаправляющий аппарат (ОНА), как элемент ступени ЦК ВД, оказывает существенное влияние на эффективность работы промежуточной ступени в целом. Со снижением расхода влияние ОНА становится более значительным. В силу того, что для высоко- и средне-расходных ступеней ОНА не играет такой значительной роли, исследования в этой области велись весьма ограниченно, и, как следствие, количество опубликованных работ по данной тематике невелико.

Одним из направлений разработки, обеспечивающим улучшение характеристик ОНА, является применение лопаток телесного профиля, то есть профиля с толщиной ~15-30% и более. Впервые применение лопаток такого типа рассматривается в монографии В.Ф. Риса (1964г.).

В настоящее время ряд иностранных компаний, таких как General Electric, MAN Turbo, Cooper, Nuovo Pignone, Dresser Rand и др. широко используют лопатки ОНА телесного профиля при создании ступеней ЦК ВД. Методы проектирования таких ОНА не афишируются и являются хорошо охраняемой информацией компаний-производителей.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является разработка методики проектирования и разработка программного комплекса для построения лопаточных аппаратов ОНА, а также оценка эффективности их работы в составе промежуточной ступени центробежного компрессора.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. создать программу расчета термодинамических свойств рабочей среды;
2. разработать методику построения лопаток произвольного профиля;
3. разработать алгоритм и создать программу для реализации метода построения лопаток произвольного профиля;
4. создать программу для расчета обтекания решетки полученных профилей;
5. разработать методику оценки эффективности решетки профилей;

6. создать интегрированный программный комплекс, включающий выше перечисленные блоки.

Методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решаются на основе методов теории центробежных компрессоров, вычислительной гидродинамики, термодинамики, дифференциальной геометрии, оптимального проектирования и экспериментальных исследований компрессоров.

Научная новизна. В представленной работе новыми являются следующие результаты:

- разработана методика построения лопаток произвольного профиля, базирующаяся на использовании сплайн-функций;
- разработан алгоритм и создана программа для реализации метода построения лопаток произвольного профиля;
- создана программа для расчета обтекания решетки полученных профилей «методом особенностей»;
- разработана методика оценки эффективности решетки профилей;
- создан интегрированный программный комплекс, позволяющий:

1) производить проектирование лопаточного аппарата; 2) рассчитывать его обтекание; 3) производить быструю оценку качества проектируемого ОНА; 4) получать чертежи лопаточного аппарата.

Теоретическая значимость работы. Создан новый метод построения лопаточных аппаратов ОНА. Разработана методика оценки эффективности лопаточных аппаратов ОНА, позволяющая на стадии проектирования оценить качество их работы в составе ступени центробежного компрессора с учетом влияния реальных свойств углеводородных газов и их смесей.

Практическая значимость работы. Разработанный комплекс программ позволяет снизить ошибки при проектировании лопаточных аппаратов ОНА, произвести оценку эффективности их работы, выбрать наиболее приемлемый вариант решетки ОНА в кратчайшее время.

Рекомендации по использованию. Результаты работы могут быть использованы при разработке турбоагрегатов для химической, нефтегазовой,

авиационной промышленности и для их модификации. Также результаты работы могут быть использованы в обучении и подготовке специалистов в области центробежных турбоагрегатов для проектирования и предварительной оценки эффективности лопаточных решеток.

Достоверность результатов. Достоверность результатов теоретических исследований подтверждена сравнением с результатами экспериментов.

Личный вклад соискателя. Автором лично выполнены следующие теоретические и прикладные разработки:

- создана программа расчета термодинамических свойств рабочей среды, количество компонентов газовых смесей расширено до 20-ти;

- создана модель построения решетки профилей обратноподводящего аппарата для центробежных машин, базирующаяся на использовании сплайн-функций;

- разработаны алгоритмы и реализованы программы для создания программного комплекса;

- создан интегрированный программный комплекс;

- проведен ряд экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные материалы докладывались на:

XI конференции по компрессоростроению, г. Казань, 1998 г.,

Всероссийской конференции СЕНСОР 2000 "Сенсоры и микросистемы", 21 - 23 июня 2000 г.,

XXX Юбилейной Неделе науки СПбГТУ, СПб, 2002г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано семь научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка из 45 наименований. Содержание работы изложено на 167 страницах (включает 39 рисунков, 3 таблицы и 2 Приложения).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении

Обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и научная и практическая значимость работы.

В главе 1 проведен обзор литературы, проанализировано состояние проблемы в настоящее время.

Рассмотрены особенности течений в неподвижных элементах малорасходных ступеней промежуточного типа с безлопаточными диффузорами. Рассмотрена специфика постановки и реализации экспериментальных исследований применительно к малорасходным ступеням центробежных компрессоров.

Рассмотрены модели потерь в неподвижных элементах проточных частей и их влияние на характеристики ступени в целом.

Рассмотрены основные аспекты профилирования лопаточных аппаратов, такие как протяженность лопаток, число лопаток и загромождение ими потока, влияние угловой протяженности лопаток, влияние высот межлопаточных каналов, влияние замедления потока в лопаточной решетке.

Рассмотрены области применения различных типов лопаточных аппаратов. Рассмотрены различные модели потерь, основанные на экспериментальных и теоретических исследованиях.

Даны оценки влияния потерь в неподвижных элементах ступеней на их эффективность.

В главе 2 приведено описание программного комплекса, входящих в него элементов, описание математических моделей и описание алгоритмов.

1. Дано определение термодинамических свойств сжимаемой среды.
2. Приведен алгоритм предварительного расчета ступени центробежного компрессора высокого давления (ЦКВД) с учетом термодинамических свойств сжимаемой среды.



Рис.1 Структура программного комплекса построения и оценки эффективности ОНА центробежного компрессора высокого давления

Структура программного комплекса приведена на рисунке 1. Такая структура позволяет использовать весь комплекс в целом, как самостоятельную единицу проектирования ОНА и интегрировать в уже существующие системы проектирования центробежных компрессоров или включать во вновь создаваемые. При этом каждый элемент может работать как самостоятельная программа. Вход в программный комплекс может осуществляться в любой из

блоков при наличии подготовленных данных, при использовании программного комплекса в полном объеме ввод данных осуществляется в блок расчета термодинамических свойств рабочей среды.

Определение термодинамических свойств сжимаемой среды, осуществляется по методу В.А.Загорученко, справедливому для давлений до 70МПа для 20 составляющих углеводородных газов и их смесей, таких как метан, этан, пропан, н-бутан, н-пентан их изомеры, ацетилен, этилен, пропилен и др.

Уравнение состояния В.А. Загорученко для многокомпонентной смеси записывается в следующем виде:

$$(pv)_{cm} = R[\alpha^*(v) + \beta^*(v) \cdot T \cdot 10^{-2} + \gamma^*(v) \cdot T^{-2} \cdot 10^4],$$

$$\alpha^*(v) = \sum_{i=1}^n x_i \left\{ \sum_{k=1}^6 a_k (10v)^{-k} \right\}_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \left\{ \sum_{k=1}^6 d_k (10v)^{-k} \right\}_{ij},$$

$$\beta^*(v) = 100 + \sum_{i=1}^n x_i \left\{ \sum_{k=1}^6 b_k (10v)^{-k} \right\}_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \left\{ \sum_{k=1}^6 e_k (10v)^{-k} \right\}_{ij},$$

$$\gamma^*(v) = \sum_{i=1}^n x_i \left\{ \sum_{k=1}^6 c_k (10v)^{-k} \right\}_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \left\{ \sum_{k=1}^6 f_k (10v)^{-k} \right\}_{ij},$$

где: p — давление, Н/м^2 ; v — удельный объем, $\text{м}^3/\text{кмоль}$; T — температура, К ; $R = 8314,3 \text{ Дж/кмольК}$, — универсальная газовая постоянная; x_i, x_j — мольные доли компонентов смеси; n — количество компонентов смеси; $a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k$ ($k=1\dots 6$) — экспериментальные коэффициенты.

Предварительный расчет ступени ЦК ВД производится с учетом влияния реальных свойств газа для определения параметров ОНА. На основании предварительного расчета определяются параметры, управляющие построением лопаточного аппарата. В основе алгоритма предварительного расчета лежит метод расчета ступени центробежного компрессора, разработанный на кафедре компрессоростроения ЛПИ. Алгоритм реализован в виде блока, входящего в программный комплекс (рис. 1).

В главе 3 дано описание построения лопаточного аппарата ОНА.

Наибольшее распространение получили методы построения средней линии профиля лопатки ОНА по дуге окружности и по заданной нагрузке (в настоящее время наиболее эффективный метод).

Предлагаемый метод базируется на использовании сплайн функций, отображенных на логарифмическую спираль. Логарифмическая спираль является линией невозмущенного стока, то есть линией стока идеальной жидкости при отсутствии возмущений. Отклонение от логарифмической спирали приводит к совершению над потоком работы и описывается кубической сплайн функцией.

В силу того, что профиль лопатки ОНА телесный, то есть имеет значительную толщину и достаточно сложную геометрию (рис.2), определить среднюю линию такой лопатки, как это делается при построении лопаток равной толщины или запроектированных как аэродинамические профили, достаточно сложно. Поэтому за базовую линию построения лопатки была принята линия вогнутой стороны лопатки.

Линия вогнутой стороны лопатки строится в результате решения дифференциального уравнения

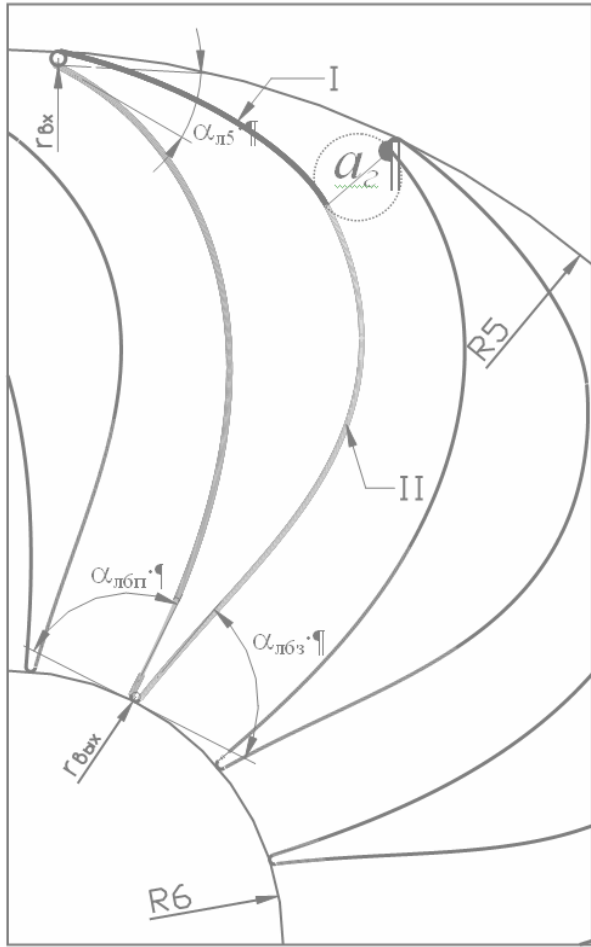


Рис.2 Построение лопатки

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{r \cdot \tan(\cos(A \cdot r^2 + B \cdot r + C))}$$

Отыскание коэффициентов уравнения осуществляется разрешением системы уравнений относительно коэффициентов A , B и C .

$$\begin{cases} \cos(\alpha_{л5\text{вот}}) = A \cdot r_5^2 + B \cdot r_5 + C \\ \cos(\alpha_{л6\text{вот}}) = A \cdot r_6^2 + B \cdot r_6 + C \\ D = 2 \cdot A \cdot r_6 + B \end{cases} \quad (1)$$

Выпуклая сторона лопатки строится двумя сопряженными сплайн функциями в полярных координатах. Сплайн функция разделена на два участка, первый – участок косога среза (участок до входа в каналную часть лопаточного аппарата ОНА), второй – каналный участок.

$$\varphi_i = A_i \cdot r_i^3 + B_i \cdot r_i^2 + C_i \cdot r_i + D_i \quad \text{где } i \text{ – номер участка.}$$

На входном участке сегмента сплайн-функция гладко сопрягается с входной скругляющей кромкой, на выходе – с начальным участком второго сегмента сплайн функции. Коэффициенты A , B , C и D подбираются таким образом, чтобы исключить наличие точек перегиба в пределах первого сегмента. Вторым сегмент сплайн функции сопрягается с первым сегментом и выходной скругляющей кромкой (рис.2).

Одной из задач работы было сведение к минимуму количества управляющих параметров при построении телесных лопаток ОНА. В результате исследований удалось свести их число к двенадцати:

$\alpha_{л5}$ – угол входа по вогнутой стороне лопатки на входе в ОНА;

$\alpha_{л6}$ – угол выхода по вогнутой стороне лопатки из ОНА;

- $\alpha_{\text{лбз}}$ – угол лопатки по выпуклой стороне на выходе из ОНА;
- R_5 – радиус входа в лопаточный аппарат ОНА;
- R_6 – радиус выхода из лопаточного аппарата ОНА;
- b_5 – ширина канала в меридиональной плоскости на входе в ОНА;
- b_6 – ширина канала в меридиональной плоскости на выходе из ОНА;
- $r_{\text{вх}}$ – радиус скругляющей окружности входной кромки лопатки ОНА;
- $r_{\text{вых}}$ – радиус скругляющей окружности выходной кромки лопатки ОНА;
- Z – число лопаток ОНА;
- $a_{\text{г}}$ – ширина горла;
- D – параметр, отвечающий за угловую протяженность лопатки ОНА.

Строго говоря, параметр D отвечает за скорость приближения угла вогнутой стороны лопатки к заданному углу выхода (обычно угол выхода лопаток ОНА равен 90°).

Этот параметр получается как свободный член в правой части системы уравнений. При задании параметра $D > 0$ угловая протяженность лопатки увеличивается. При значениях $D < 0$ на вогнутой стороне лопатки образуется точка перегиба, при этом, с уменьшением D , точка перегиба смещается к входной части лопатки (рис. 3).

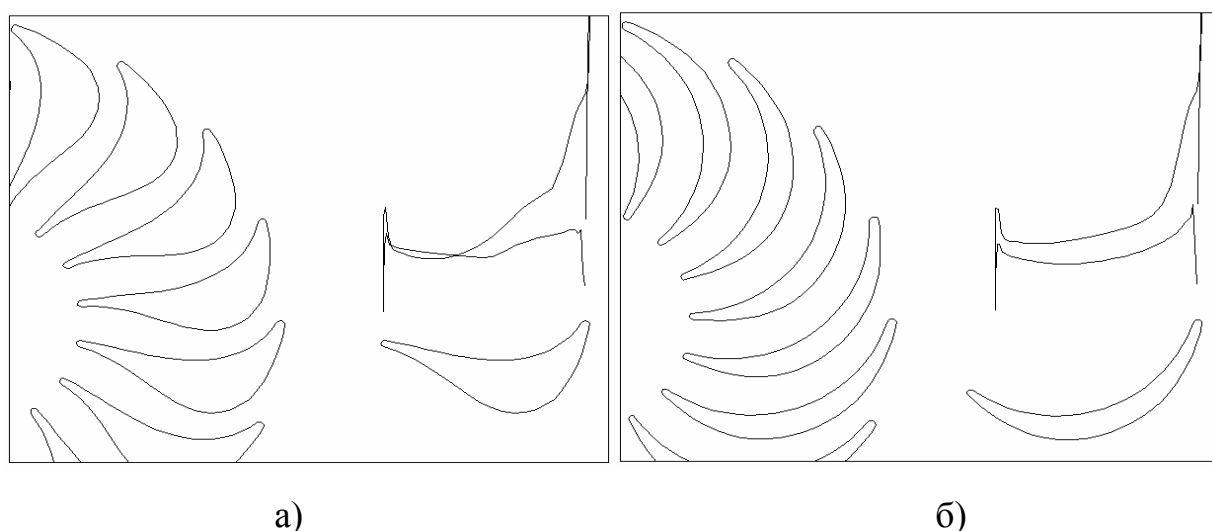


Рис.3 Лопатки ОНА и распределение скоростей для различной угловой протяженности лопаток а) $D=-1$, б) $D=2.5$

Этих параметров оказалось достаточно для построения лопаток самой

разнообразной конфигурации, от лопаток, изображенных на рисунке 3, до лопаток равной толщины.

В главе 4 дано описание расчета обтекания лопаточного аппарата ОНА.

Расчет потенциального обтекания производится по «методу особенностей». Данный метод применяется для расчета идеального обтекания профилей, то есть обтекания без учета трения, и обладает рядом достоинств и недостатков. При использовании «метода особенностей» профиль заменяется рядом вихреисточников, интенсивность этих вихреисточников рассчитывается таким образом, чтобы удовлетворить критерию Кутта-Жуковского, что позволяет оценить циркуляцию, создаваемую исследуемым профилем, и получить распределения скоростей по его поверхности.

В главе 5 дана оценка эффективности построенного аппарата применительно к заданной ступени центробежного компрессора высокого давления.

Для оценки эффективности лопаточного аппарата предложена зависимость, включающая в себя потери энергии, условно разделенные на потери трения, потери смещения и потери, возникающие при вторичных токах в межлопаточном канале. Строго говоря, все потери являются потерями на трение, но имеют разную природу происхождения.

Формула для определения эффективности лопаточной решетки ОНА имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_{n56}^* = & \frac{2 \cdot z \cdot \bar{C}_x^3 \cdot F_l \cdot \varepsilon_{cp56}}{\Psi_i \cdot \Phi \cdot \pi \cdot D_2^2} \left\{ \left(\left(\frac{C_{n,cp}}{C_{cp}} \right)^2 \left[x_4 + x_5 \left(\frac{\Delta C_n}{C_{cp}} \frac{1}{1 + x_6 C_a^{x_7}} \right) \right]^{x_8} \right) \cdot \frac{F_n}{F_l} + \right. \\ & + \left(\left(\frac{C_{3,cp}}{C_{cp}} \right)^2 \left[x_4 + x_5 \left(\frac{\Delta C_3}{C_{cp}} \cdot (1 + x_6 C_a^{x_7}) \right) \right]^{x_8} \right) \cdot \frac{F_3}{F_l} + \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{C_{n,cp}}{C_{cp}} \right)^2 \left[x_4 + x_5 \left(\frac{\Delta C_n}{C_{cp}} \frac{1}{1 + x_6 C_a^{x_7}} \right) \right]^{x_8} + \left(\frac{C_{3,cp}}{C_{cp}} \right)^2 \left[x_4 + x_5 \left(\frac{\Delta C_3}{C_{cp}} \cdot (1 + x_6 C_a^{x_7}) \right) \right]^{x_8} \right] \cdot \frac{2F_{кан}}{F_l} + \\ & + x_9 \frac{C_a^2}{(b_{cp}/L)^{x_{10}}} + \frac{\Phi \cdot \pi \cdot D_2^2}{z \cdot \bar{C}_x^2 \cdot F_l \cdot \varepsilon_{cp56}} \cdot \left(\frac{-P_{кр} \cdot \bar{S} \cdot \varepsilon_{cp56} \cdot \bar{D}_6 \cdot \bar{b}_6 \cdot \bar{C}_6}{\Phi} \right) + x_{12} \frac{C'_5}{4} \left(\frac{\text{Sin}(i_5^*)}{\text{Sin}(\alpha_{л5})} \right)^2 \left. \right\} \square \\ & \left[1 + x_{13} \text{Re}_{C56}^{-x_{14}} \right] \cdot \left[1 + x_{15} \left(\frac{b_{cp}}{L} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

В эту формулу включены основные виды потерь на профиле и в канале лопаточного аппарата, такие как:

- потери на передней относительно потока (вогнутой) стороне лопатки;
- потери на задней относительно потока (выпуклой) стороне лопатки;
- потери на ограничивающих поверхностях канала;
- потери на трение потока о поверхности канала, образованные лопатками;
- потери, формируемые вторичными токами внутри канала;
- потери смешения потоков с различной кинетической энергией (скоростью).

В главе 6 приводятся результаты расчетов по методикам, описанным в главе 5, и их сопоставление с результатами экспериментальных исследований.

Проведен численный анализ (для ступени компрессора со следующими параметрами: $\Phi = 0.01$, $\Psi_T = 0.59$, $D_4/D_2 = 1.4$) различных лопаточных аппаратов по наиболее влияющим параметрам, таким как: относительная ширина канала на входе в ОНА (рис.4); число лопаток (рис.5); протяженность лопаток (рис.6); ширина горла канала (рис.7).

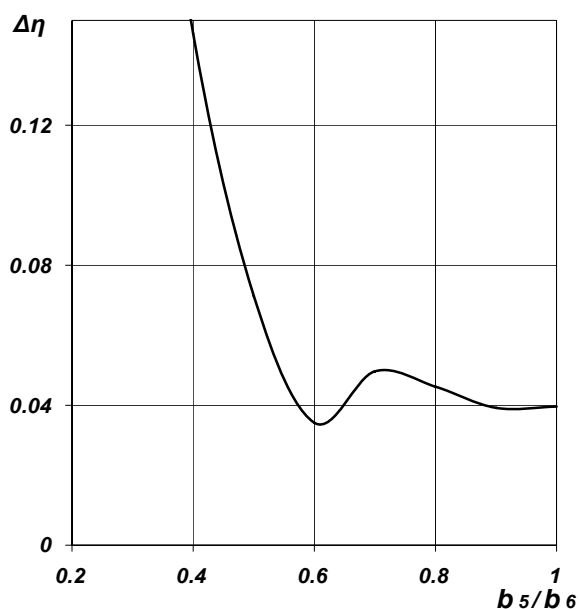


Рис. 4 Влияние ширины канала на входе в ОНА на потери

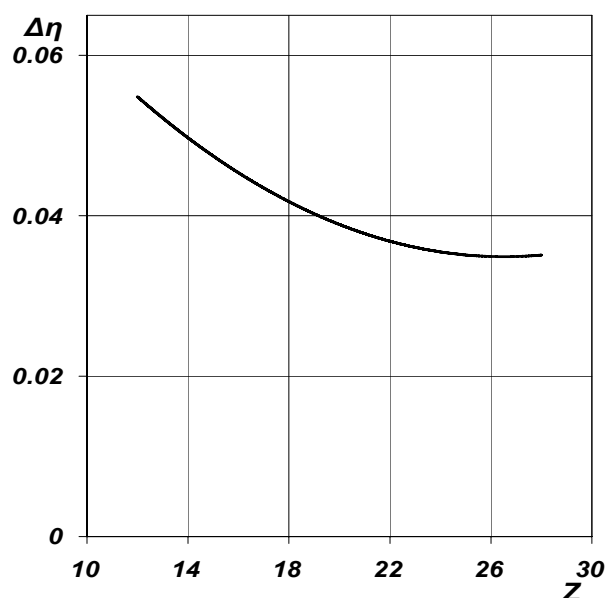


Рис. 5 Влияние числа лопаток ОНА на потери

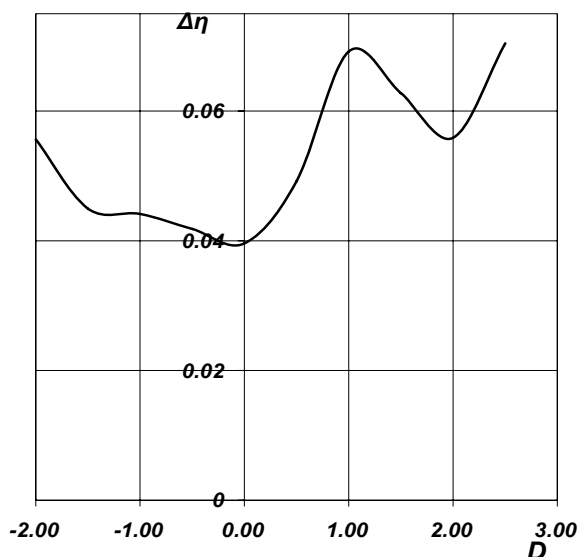


Рис. 6 Влияние угловой протяженности лопаток ОНА на потери

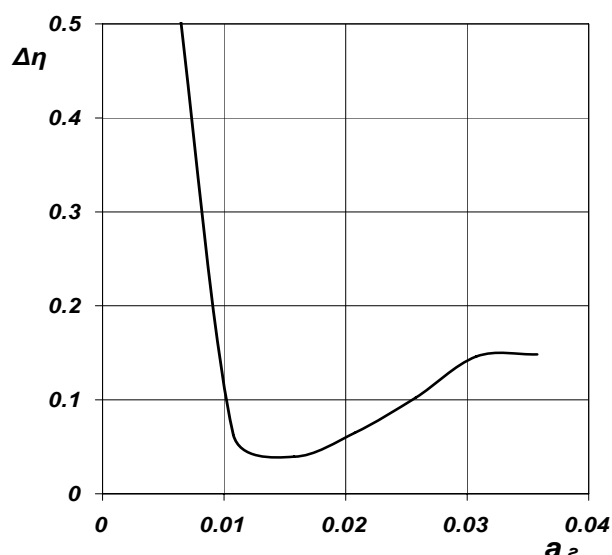


Рис. 7 Влияние ширины горла канала ОНА на потери

На основе данного анализа выявлена возможность оптимизации лопаточного аппарата.

Проведено сравнение результатов, полученных по представленным моделям, с рядом экспериментальных исследований.

Проверка работоспособности математической модели потерь производилась для следующих ступеней центробежного компрессора, испытанных на кафедре компрессорной вакуумной и холодильной техники С-ПБПУ: СВД-1; СВД-2; СВД-7; СВД-8; СВД-11-3; СВД-11-2; СВД-11-1; СВД-11-1-0,47; СВД-11-1-0,67.

Все представленные ступени были снабжены одним обратноподключающим аппаратом (рис. 8).

Для проверки адекватности работы модели потерь была построена зависимость коэффициента потерь от угла атаки на лопатки ОНА (рис.8). Такой подход позволяет исключить влияние на оценку потерь расходной и напорной характеристик исследуемых ступеней. Рисунок 9 иллюстрирует работу программного комплекса, на примере смоделированного обратноподключающего аппарата.

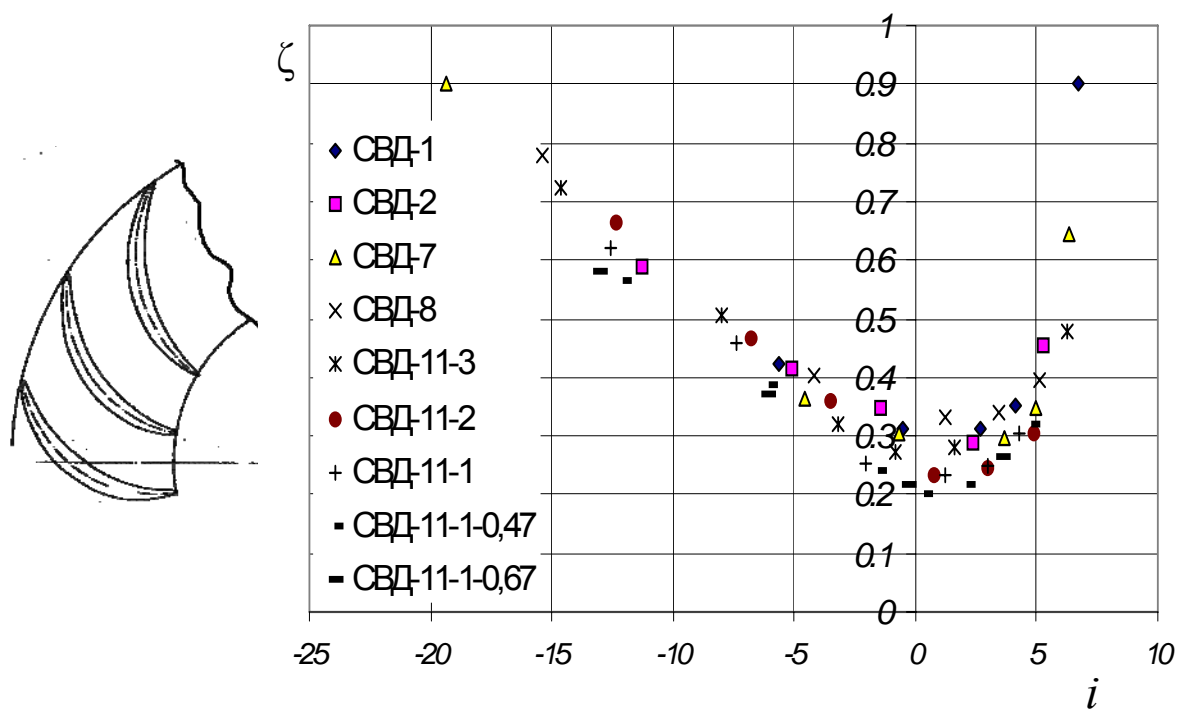


Рис. 8 Зависимость коэффициента потерь в решетке обратнаправляющего аппарата от угла атаки

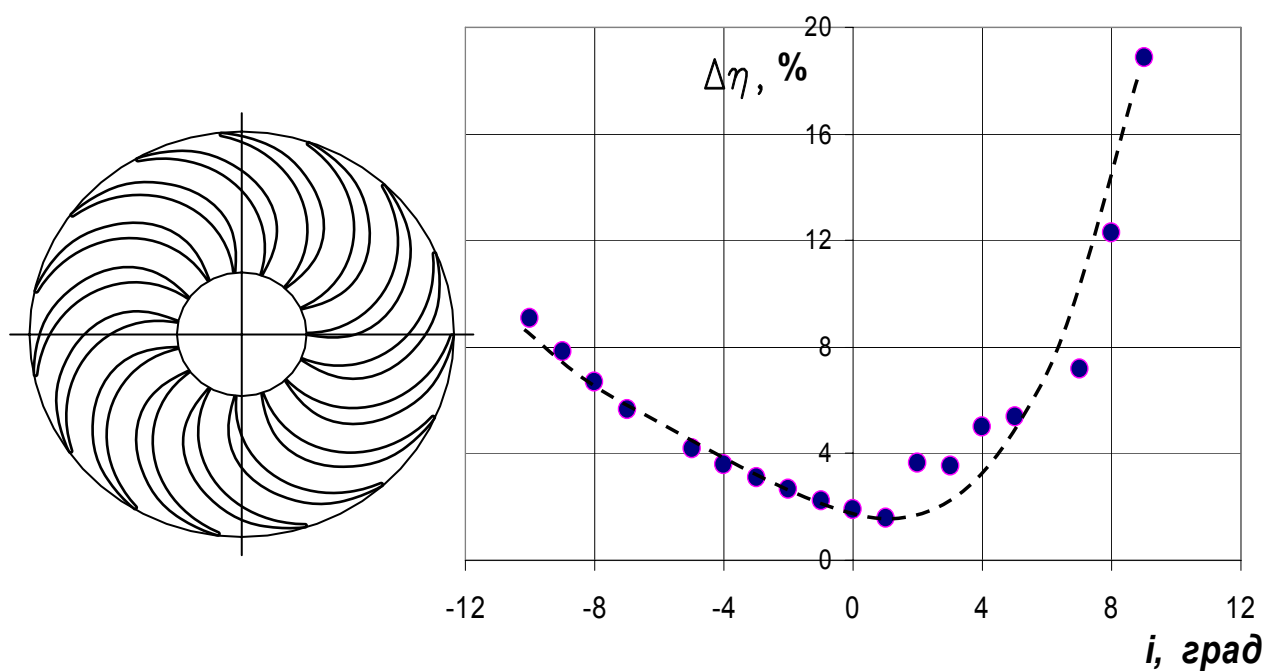


Рис. 9 Внешний вид и потери в ОНА.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. модифицирована программа расчета термодинамических свойств рабочей среды, количество компонентов газовых смесей увеличено до 20-ти;
2. разработана методика построения лопаток произвольного профиля, базирующаяся на использовании сплайн-функций;
3. разработан алгоритм и создана программа для реализации метода построения лопаток произвольного профиля;
4. создана программа для расчета обтекания решетки полученных профилей «методом особенностей»;
5. разработана методика оценки эффективности решетки профилей;
6. создан интегрированный программный комплекс, позволяющий:
 - а) производить проектирование лопаточного аппарата;
 - б) рассчитывать его обтекание;
 - в) производить быструю оценку качества проектируемого ОНА;
 - г) получать чертежи лопаточного аппарата.

Разработанный комплекс программ оптимального проектирования ОНА позволяет производить расчеты с минимальными затратами времени, так как использованный «метод особенностей» расчета обтекания лопаток ОНА потенциальным потоком является весьма быстрым в сравнении с конечно-разностными методами. Это позволяет производить множественные расчеты в кратчайшие сроки и выбирать оптимальный ОНА с точки зрения проектировщика.

Для оценки эффективности использовалась скорректированная модель потерь, учитывающая потери на ограничивающих поверхностях канала ОНА; потери на профиле лопатки, при этом из-за большой разности в протяженности выпуклой и вогнутой сторон лопатки ОНА расчет потерь для этих сторон производился отдельно для каждой из сторон; потерь смешения и ударных потерь. Для оценки наличия отрыва по задней стороне лопатки ОНА был

применен формпараметр Лойцянского Л.Г. В результате вычислений потерь были получены правдоподобные результаты.

Расчеты показывают, что можно найти такой набор геометрических параметров, который позволит построить оптимальную с точки зрения потерь решетку ОНА.

Сравнение с результатами экспериментальных исследований показало хорошую работоспособность предложенной модели потерь. При обтекании решетки профилей ОНА, близких к оптимальным ($i=-5^\circ \dots +3^\circ$), ошибка не превышает 5%, при больших углах атаки ошибка может достигать до 13%.

В приложении А представлена детальная структура программного комплекса и описана система обмена данными между его блоками.

В приложении Б приведены тексты основных программ, входящих в программный комплекс.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Коршунов, А.В.** Термогазодинамический расчет центробежных компрессоров, сжимающих реальные газы и их смеси [Текст]: Учебное пособие / А.В. Коршунов, Л.Я. Стрижак : Учеб. пособие. — СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1998. — 59 с.

2. **Коршунов, А.В.** Особенности проектирования неподвижных элементов малорасходной ступени центробежного компрессора [Текст] / А.В. Коршунов, Н.И. Садовский, Л.Я. Стрижак, И.П. Суслина // Тезисы доклада одиннадцатой конференции по компрессоростроению, г. Казань, 1998. – С. 93-96.

3. **Коршунов, А.В.** Анализ термогазодинамических параметров многокомпонентных газовых смесей в элементах проточной части центробежного компрессора высокого давления. [Текст] / А.В. Коршунов, Л.Я. Стрижак // Труды научной школы компрессоростроения СПбГТУ. Сборник реферативных статей., С-Пб, 1999. – С. 255-259.

4. **Дмитриев, А.А.** Использование микротехнологий в компрессоростроении. [Текст] / А.А. Дмитриев, А.В. Коршунов // XXX Юбилейная Неделя науки

СПбГТУ.4.III: Материалы межвузовской научной конференции. СПб., 2002. – С.93.

5. **Акульшин, Ю.Д.** Сенсоры для аэродинамического эксперимента и диагностирования компрессоров. [Текст] / Ю.Д. Акульшин, Р.А. Измайлов, А.Н. Казакин, А.В. Коршунов, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев // Тезисы докладов всероссийской конференции СЕНСОП 2000 "Сенсоры и микросистемы", 21 - 23 июня 2000. – С.117-118.

6. **Коршунов, А.В.** Методика проектирования и оценки эффективности обратноподводящих аппаратов малорасходных ступеней центробежных компрессоров высокого давления. [Текст] / А.В. Коршунов, С.Ю. Кулаков, Л.Я. Стрижак // Компрессорная техника и пневматика, №1. февраль 2006 – С.16-20.

7. **Коршунов, А.В.** Анализ влияния геометрических характеристик решетки обратноподводящего аппарата (ОНА) на его эффективность. [Текст] / А.В. Коршунов, Л.Я. Стрижак // Компрессорная техника и пневматика, №2 март. – 2009. – С. 12-15.