Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт энергетики

На правах рукописи

Гилева Любовь Васильевна

Тема научно-квалификационной работы (диссертации)
Совершенствование методики проектирования входных радиальных устройств турбокомпрессоров

Направление подготовки 15.06.01 – Машиностроение

Код и наименование

Направленность 15.06.01_10 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Гилева Л.В.
Научный руководитель: доц. к.т.н.
Кожухов Ю.В.

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена в высшей школе энергетического машиностроения института энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Лебедев Александр Анатольевич, к.т.н., доц.*

Научный руководитель: – *Кожухов Юрий Владимирович, к.т.н., доц.*

Рецензент: – *Пронин Владимир Александрович проф., д.т.н., профессор факультета низкотемпературной энергетики ФГАОУ ВО СПБНИУ ИТМО*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: http://elib.spbstu.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В данный момент опережающими темпами происходит развитие отраслей промышленности, которые определяют технический прогресс, в частности: энергетика, добыча нефти и газа, машиностроение, химическая промышленность. Все эти отрасли являются крупными потребителями турбокомпрессоров. Интенсификация экономики и появившаяся тенденция роста единичной мощности компрессоров привели к повышению требований к их экономичности, надежности, снижению стоимости металлоемкости. В значительной степени вышеуказанные требования могут быть удовлетворены за счет совершенствования входных патрубков турбокомпрессоров. Также обеспечение высокого коэффициента полезного действия центробежного компрессора является важной задачей в связи с большой энергоемкостью рабочего процесса

Известно, что от степени совершенства входного устройства, в первую очередь более и менее благоприятной структуры потока за ним, в значительной степени зависит эффективность работы рабочего колеса, а большие гидравлические потери потока за входным устройством приводят к значительному падению КПД турбокомпрессоров и сужению рабочей зоны их характеристики. Поэтому необходимо создавать входные устройства турбокомпрессоров с минимальными потерями, возможно более благоприятным полем скоростей перед рабочим колесом и, естественно, с ограниченными радиальными и осевыми габаритами, подчиняющимися условию рациональной компоновки турбокомпрессора. Проектирование высокоэффективного входного устройства турбокомпрессора в ограниченных габаритах представляет собой сложную задачу и поэтому поиск рациональных приемов профилирования входного патрубка имеет большое значение.

Очевидно, что экспериментальная обработка таких сложных объектов проточной части турбокомпрессоров как входные устройства является трудоемкой, дорогостоящей и, следовательно, неоправданно удлиняет и удорожает процесс проектирования и доводки турбокомпрессоров. Успехи в развитии вычислительной газодинамики, разработка метода конечных элементов, появление суперкомпьютеров обеспечили возможность подойти к решению такой сложной задачи, как теоретическое определение поля скоростей во входном патрубке турбокомпрессора.

Актуальность данной работы состоит в том, что входной патрубок оказывает существенное влияние на характеристики ступени. При этом играют роль как потери в самом патрубке, так и потери в колесе, возникающие за счет неравномерности на входе в него, создаваемой входным патрубком. Неудачное профилирование проточной части патрубка может снизить кпд ступени на 3-4% и уменьшить ширину рабочей зоны характеристики турбокомпрессора, а это существенные потери для современных машин.

Цель и задачи исследования

Подбор и совершенствование методики проектирования входных радиальных устройств турбокомпрессоров, определение оптимальных геометрических размеров входных радиальных устройств центробежных турбокомпрессоров, расчет потока в каналах компрессоров данного типа методами вычислительной газодинамики

В работе поставлены следующие задачи:

Совершенствование комплекса газодинамического проектирования входных радиальных устройств турбокомпрессоров; разработка численных моделей по существующим входным устройствам с имеющимися для них данными экспериментальных исследований; верификация характеристик численных моделей методами вычислительной газодинамики на основе экспериментальных данных; анализ результатов расчета распределения скоростей невязкого и вязкого потока, полученного по численной CFD (computation fluid dynamic, вычислительная газодинамика) – модели; разработка параметрической модели входного радиального устройства турбокомпрессора; определение необходимых соотношений газодинамических параметров ступени для цикла оптимизации; разработка алгоритма оптимизации геометрии входных устройств на основе расчета вязкого трехмерного потока; разработка комплекса рекомендаций применительно к входным устройствам турбокомпрессоров по алгоритму проведения проектирования входных радиальных устройств турбокомпрессоров; разработка систематизированных рекомендаций применительно а входным радиальным устройствам турбокомпрессоров по проведению численного эксперимента.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в совершенствовании методики проектирования входных радиальных устройств турбокомпрессоров, выработке рекомендаций по проведению моделирования газодинамических характеристик, определение параметров и критериев оптимизации для входных радиальных устройств турбокомпрессоров.

Теоретическая и практическая значимость

Санкт-Петербург является крупнейшим отечественным центром энергомашиностроения и в частности, крупнейшим центром по производству компрессоров различных видов и назначения (более десятка предприятий). Результаты исследований будут иметь практическую значимость для предприятий изготовителей турбомашин при реализации программ импортозамещения и импортоопережения: ЗАО «РЭП Холдинг» (бывш. ОАО «Невский завод»), ОАО «Компрессорный комплекс», ОАО «Климов», ОАО «Энергомашкорпорация» и др. На этих предприятиях будут востребованы разработки данного научного проекта. В то же время, результаты исследований будут включены в программу подготовки специалистов для

промышленности в ФГАОУ «Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого» (дипломное проектирование, студенческие НИОКРы, лекционные курсы и лабораторные работы по дисциплинам «Теория турбомашин» и «Энергетические машины и установки» для студентов кафедры «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника»)

Апробация работы

Результаты исследований изложены в докладе на 8 - ой международной научно - технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (Омск, 2018 г.), на 9the International Conference on Compressors and their Systems (г. Лондон 2015), а также основные результаты научного доклада были представлены на научно-технических конференциях студентов, аспирантов, молодых ученых «Неделя науки» в 2015, 2016 и 2018 годах.

Публикации

По теме научного доклада опубликовано 9 статей, из них в рецензируемых журналах 4.

Представление научного доклада: основные положения

На кафедре КВиХТ разработана концепция моделирования входных устройств турбокомпрессоров, для которых отсутствуют достоверные экспериментальные данные, также нет четкой методики проектирования входных устройств с точными рекомендациями.

Согласно предложенной в данной работе концепции порядок проектирования следующий:

1. Проводится первичное вариантное газодинамическое проектирование по методике, существующей на данный момент, на основе испытанных ступеней экспериментальной базы данных кафедры.
2. По алгоритму многокритериальной и многопараметрической оптимизации производится, в автоматическом режиме, построение геометрической модели проточной части, расчетной сетки и трехмерный вязкий расчет методами вычислительной газодинамики в программном комплексе Ansys. По наилучшему варианту оптимизации определяются коэффициенты потерь входных устройств для уточненного газодинамического расчета.
4. Проведение уточненного газодинамического расчета на основе результатов численного расчета и окончательный поверочный CFD расчет газодинамических характеристик центробежного компрессора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Расчет параметров входного устройства турбокомпрессора, ее оптимизация производятся с помощью методики комплексного расчетно-теоретического исследования, в общем случае имеющей следующую последовательность:

1) Предварительный расчет входного устройства
2) Расчет потерь во входном устройстве
4) Вычисление оптимальных параметров проточной части

Предварительный расчет выполняется путем решения обратной и прямой задачи. При решении обратной задачи задаются: начальные полные давление и температура, массовый расход, скорость потока на входе во входное устройство, решением является - геометрические размеры входного устройства. При решении прямой задачи задаются все геометрические размеры входного устройства, скорость потока, в результате определяются параметры потока во входном устройстве и ее эффективность. Оцениваются потери во входном устройстве.

В настоящий момент с ростом возможностей ЭВМ широко внедряются методы вычислительной газодинамики, позволяющие проводить численные CFD (Computational Fluid Dynamics) расчеты входных устройств на суперкомпьютере. В высшей школе энергетического машиностроения СПбПУ, с участием автора, отработана методика проведения таких расчетов для различных входных устройств турбокомпрессоров. Такой подход позволяет провести серию вариантных расчетов на стадии проектирования и значительно уменьшить число натурных доводочных экспериментов или, в ряде случаев, вообще отказаться от таковых. В CFD методах используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, в приближении Буссинеска для определения вязкости, замкнутые с помощью полуэмпирических моделей турбулентности (м.т.). Многие эмпирические коэффициенты основаны на классических простейших течениях в гидродинамике: обтекании пластины, обтекании цилиндра, течения в круглой трубе и не могут в полной мере отразить эффекты, возникающие в течении газа во входных устройствах турбокомпрессоров. Поэтому необходимо вести их качественный подбор. Для определения эмпирических коэффициентов модели турбулентности (валидация, или калибровка, модели турбулентности) необходимо сравнивать результаты расчета входных устройств, для которых есть характеристики натурного эксперимента, т.е. проводить верификацию численного исследования. Таким образом, найденные эмпирические коэффициенты могут использоваться для корректной оценки потерь в

элементах и получения оценочных газодинамических характеристик проектируемых входных устройств турбокомпрессоров.

Выбор и уточнение оптимальных параметров проточной части предлагается производить путем задания параметрической модели проточной части с внедрением в алгоритм многопараметрической и многокритериальной оптимизации, что позволяет производить серию вариантных расчетов с получениям множества Парето, т.е множества равнооптимальных решений.

На первом этапе исследования выбираются современные конструкции входных устройств исходя из современных требований производительности, напора и энергоэффективности. Производится выбор и создание моделей объектов исследования для проведения численного исследования методами вычислительной газодинамики, для которых имеются экспериментальные данные.

Разрабатывается комплекс газодинамического проектирования прямой и обратной задачи. Производится верификация исследования характеристик численных моделей методами вычислительной газодинамики с существующими экспериментальными данными. Производится определения оптимальных эмпирических коэффициентов для модели турбулентности – калибровка м.т.

Анализ результатов расчета распределения скоростей невязкого потока и распределения скоростей вязкого потока, полученного по численной CFD-модели.

На втором этапе исследования:

Разработка параметрической модели проточной части входного устройства. Разработка газодинамических соотношений для цикла оптимизации. Разработка алгоритма проведения автоматической многокритериальной и многопараметрической оптимизации проточных частей входных устройств турбокомпрессоров на основе расчета вязкого трехмерного потока.

Разработка комплексных рекомендаций применительно к входным устройствам турбокомпрессоров по методике проведения многокритериальной и многопараметрической оптимизации проточной части на основе расчета вязкого пространственного потока.

Разработка систематизированных рекомендаций применительно к входным устройствам турбокомпрессоров по проведению численного расчета.

Совершенствование методики проектирования и разработка рекомендаций к проектированию входных устройств турбокомпрессоров.

Результаты работы имеют практический и прикладной характер для исследования, разработки и производства турбокомпрессоров. Использование совершенствованной методики проектирования и модели имитационного моделирования газодинамических характеристик входных устройств турбокомпрессора удешевит цикл производства машины, поскольку в значительной мере отпадает необходимость в проведении натурного эксперимента по доводке проточной части входного устройства.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектом исследования является входное радиальное устройство турбокомпрессора. Конструкция входного устройства состоит из следующих элементов: входной подводящий патрубок, спиральная камера и осесимметричный конфузор. На рисунке 1. изображена схема входного радиального устройства турбокомпрессора с указанием основных размеров.

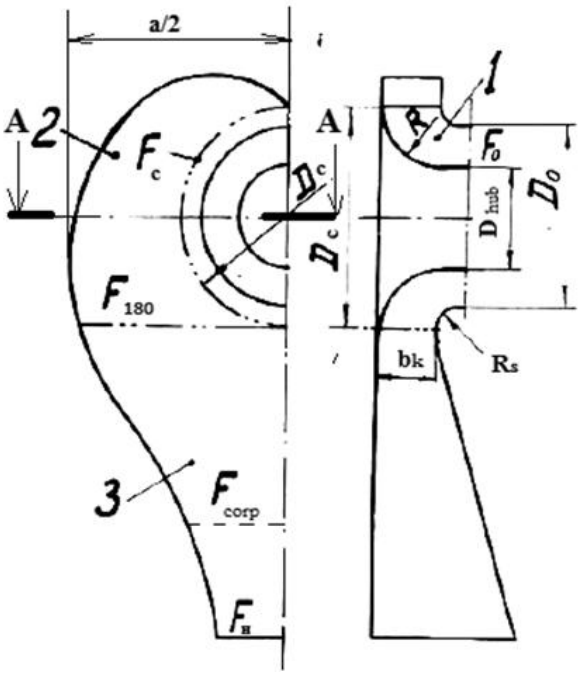

Рис. 1 . Схема входного радиального устройства турбокомпрессора

Подобная схема входного устройства турбокомпрессора на рис. 1 используется в составе различных турбомашин промежуточных и первых секций, турбостартеров авиационных двигателей, вспомогательных силовых установках реактивных самолетов, одноступенчатых нагнетателей природного газа, многовальных центробежных компрессоров общепромышленного назначения.

Результаты и их обсуждение

В процессе расчётов и оптимизации определяются параметры в следующих сечениях проточной части входного устройства:
1-1 – вход во входное устройство; 2-2 – выход из входного устройства;

Выбор оптимального сочетания конструктивных и газодинамических параметров проточной части входного устройства в указанных сечениях проводится с применением расчётных моделей потерь в элементах. Используется модель потерь, существующая для исследования входных устройств турбокомпрессоров для компрессоров общепромышленного назначения.

Применена следующая модель:

1. Входное устройство.

Коэффициент потерь $\varsigma_{ВУ}$ входного устройства определяется типом входного устройства (осевой патрубок, криволинейный патрубок), от условного числа Маха M_u.

Определяются следующие геометрические и газодинамические параметры:

D_2 – диаметр рабочего колеса; $D_{вт}$ – диаметр втулки;

$\bar{D}_{вт} = D_{вт}/D_2$ – относительный диаметр втулки;

$D_{н1}$ – наружный диаметр на входе;

$\bar{D}_{н1} = D_н/D_2$ – относительный диаметр втулки;

$\Delta p^*_{вк} = p^*_{вк} - p^*_0$ — потери полного давления на участке от входного фланца патрубка до сечения перед ВНА

F_0 - площадь на выходе из камеры.

ρ_1 - плотность всасываемого воздуха.

$F_{вх}$ - площадь входа во входной патрубок.

$D_{тр}$ - диаметр входного трубопровода.

$r_{вх}$ - радиус сопряжения,

$F_{вх}$ - площадь на входе в камеру,

$n_{вк}$ - конфузорность всей камеры,

$F_{конф}$ - площадь входа в конфузор.

$D_{конф}$ - диаметр входа в конфузор.

h - ширина канала на входе в конфузор.

После определения основных размеров и газодинамических параметров входного устройства производится проектирование элементов входного устройства турбокомпрессора.

Многокритериальная и многопараметрическая оптимизация

Алгоритм проведения автоматической многопараметрической и многокритериальной оптимизации разработан автором в программном комплексе Ansys 18 при помощи программного модуля Ansys Design Exploration. На рисунке 2 показана схема оптимизации в рабочей среде Ansys Workbench. Все программные модули, включая сеточный генератор и решатель, связаны между собой, что позволяет в автоматическом режиме проводить перестройку расчетной области и расчет каждого индивидуального варианта на основе введенных исходных данных.

Выбор и уточнение оптимальных параметров входных устройств производится путем задания параметрической модели проточной части с внедрением в алгоритм многопараметрической и многокритериальной оптимизации, что позволяет производить серию вариантных расчетов с получениям множества Парето, т.е множества равно оптимальных решений.

На рисунке 3 изображены возможные варианты входных радиальных устройств для проведения многокритериальной и многопараметрической оптимизации.

На рисунке 4 изображен пример результата расчета многокритериального и многопараметрического входного устройства.

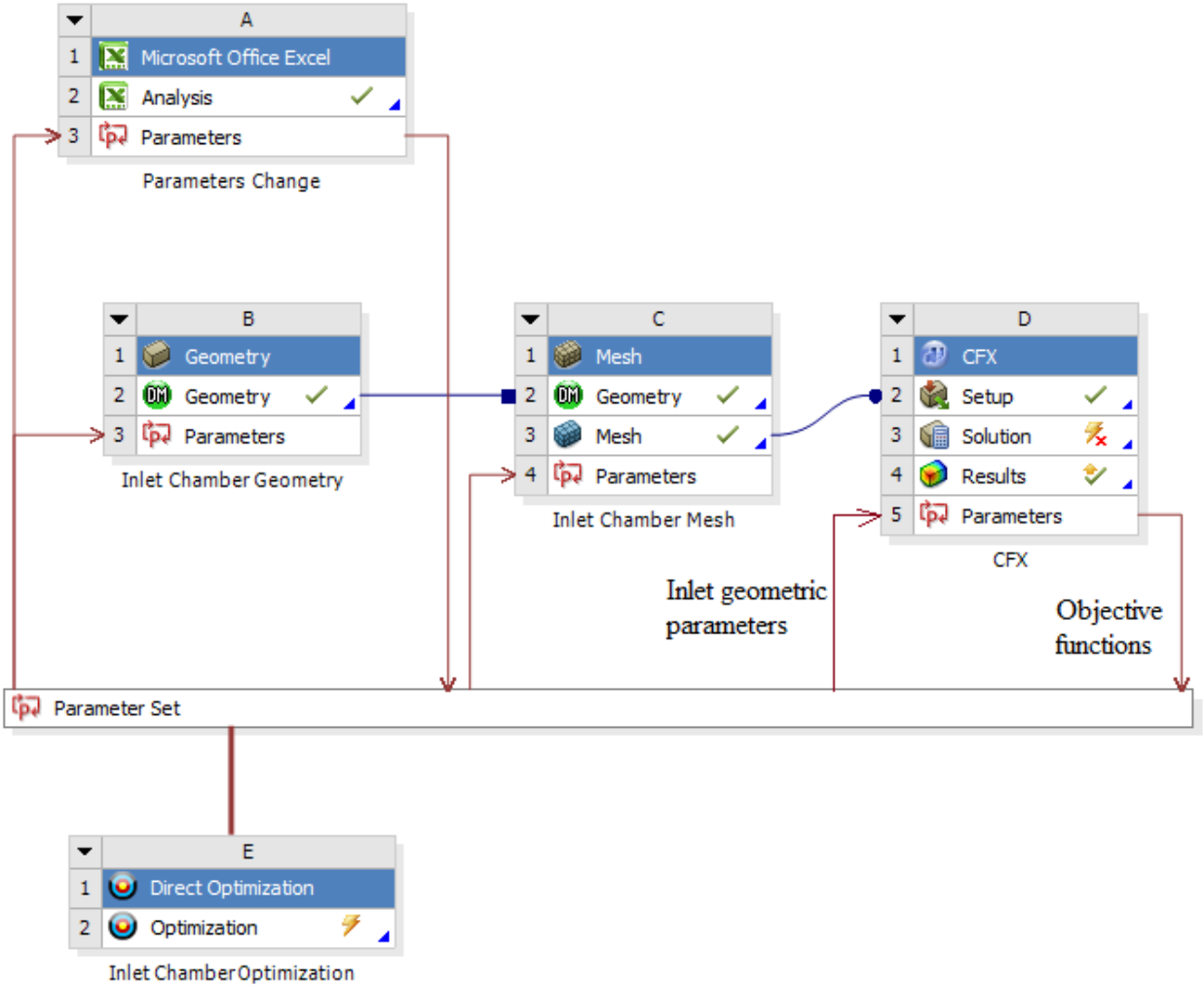

Рис. 2. Схема связи между программными модулями и параметризация входного устройства турбокомпрессора

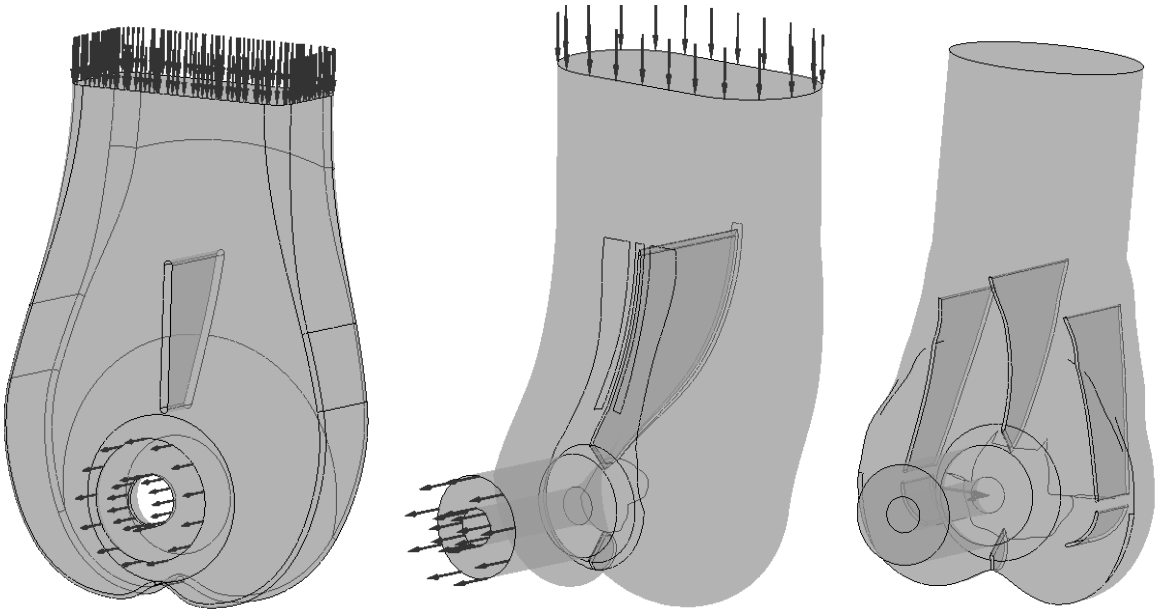

Рис. 3. Возможные варианты входных устройств для проведения многокритериальной и многопараметрической оптимизации (слева с лопаточным диффузором, справа с безлопаточным диффузором)

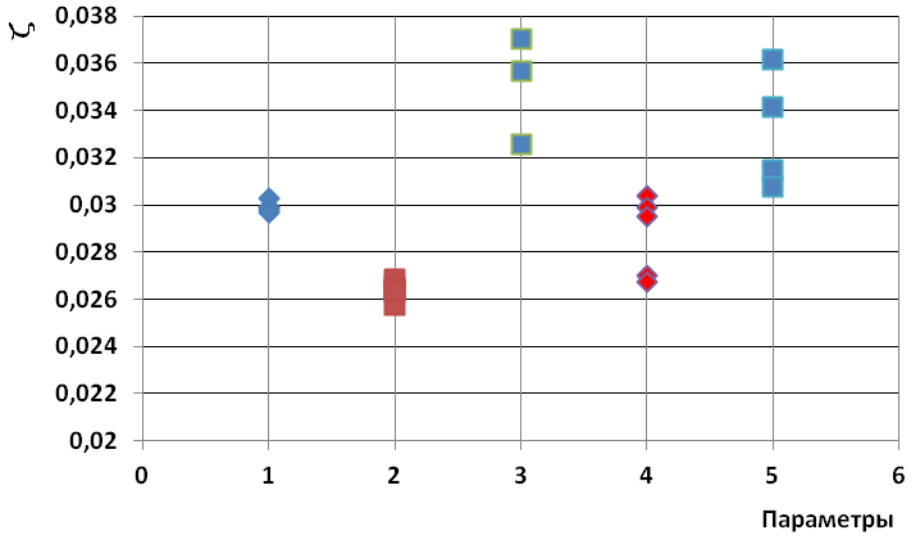

Рис.4. Пример результата расчета многокритериальной и многопараметрического входного устройства (Зависимости коэффициента потерь по полным параметрам в зависимости от конфузорности и других геометрических и газодинамических соотношений 1 – конфузорность спиральной камеры, 2 – конфузорность осесимметричного диффузора, 3 – направляющее ребро, 4 – угол наклона задней стенки, 5 – радиус закругления сечения спиральной камеры).

Достоверность результатов CFD-моделирования

Для определения возникающих погрешностей в расчете необходимо сравнивать результаты расчета турбокомпрессоров, для которых есть характеристики натурного эксперимента, т.е. проводить верификацию численного исследования. Таким образом, возможна корректировка потерь в элементах и получения оценочных газодинамических характеристик проектируемых перспективных центробежных компрессоров. На рисунке 5 изображон пример сопоставления основных параметров энергоэффективноси входного устройства с результатами натурных испытаний. Результат сопоставления соответсвует инженерной погрешности 4%.

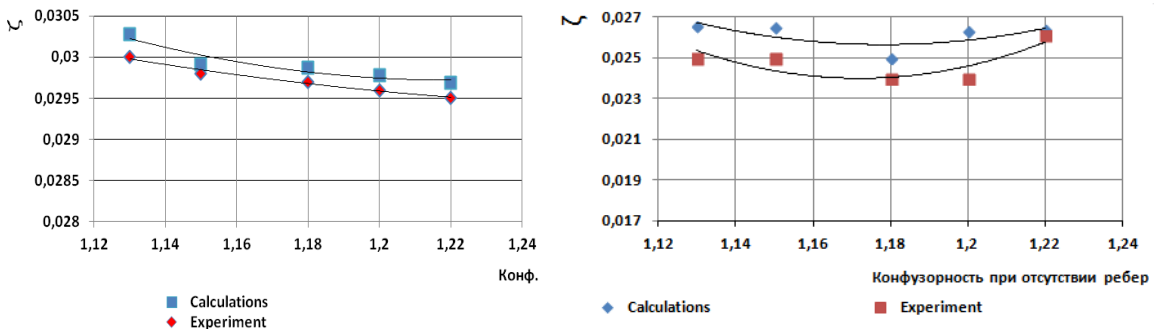

Рис. 5. Графики зависимости коэффициента потерь от конфузорности спиральной камеры для различных моделей натурного эксперимента

После проведения поверочного расчета методами вычислительной газодинамики производится анализ газодинамических характеристик, рассчитываются коэффициенты потерь и другие газодинамические параметры, оценивается структура потока на предмет качества аэродинамической формы проточной части.

Вносятся действительные коэффициенты потерь и полезного действия в одномерное газодинамическое проектирование элементов центробежного компрессора, и повторяется цикл до окончательного поверочного трехмерного расчета методами вычислительной газодинамики.

Таким образом, разработана методика проектирования перспективных одноступенчатых центробежных компрессоров и двухзвенных ступеней с осерадиальным рабочим колесом на основе методов вычислительной газодинамики и математического программирования.

Заключение

Разработаны программные модули газодинамического проектирования, невязкого расчета входных устройств. Разработана параметрическая модель построения входного устройства. Согласованы и отлажены расчетные модули элементов методики, проверена их работоспособность.

Точность моделирования подтверждена наличием верификационной базы с соответствующими показателями рабочих параметров и эффективности.

Благодаря методам математического программирования возможно, на стадии проектирования, исследование многочисленных вариаций геометрической формы для достижения наиболее благоприятного аэродинамического совершенства проточной части.

На основе разработанного метода проектирования с применением верификации данных в дальнейшем будут получены аналитические

зависимости, описывающие характеристики двухзвенных центробежных компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Гилева Л.В., Кожухов Ю.В., Зуев А.М., Лебедев А.А., Юн В.К. Численное моделирование течения в радиальных входных устройствах центробежного компрессора с валидацией результатов расчёта и оценкой влияния количества дефлекторов, «Компрессорная техника и пневматика», №3, 2016. с. 18 – 23.

Публикации в других изданиях

1. Reshetnikova L.V., Kozhukhov Y.V., Yun V.K., Prokopovich M.V. Numerical Investigation of Different Radial Inlet Forms for Centrifugal Compressor and Influence of the Deflectors Number by Means of Computational Fluid Dynamics Methods with Computational Model Validation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 90 conference 1. Materials of the 9th International conference on compressors and their systems, London, United Kingdom. 2015 (SCOPUS) http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/90/1/012047.
2. Gileva L.V.,Kozhukhov, Y.V., Zuev, A.V. Improvement methods for design of turbocompressors inlet radial chambers. 2018) AIP Conference Proceedings, 2007, статья № 030050. DOI: 10.1063/1.5051911
3. L. V. Gileva, S.V. Kartashov V.M. Ivanov A.V. Zuev “Verification of the CFD calculation for the centrifugal compressor medium flow model stages with the help of supercomputer” MATEC Web of Conferences 245, 09010 (2018 https://doi.org/10.1051/matecconf/201824509011
4. Гилева Л.В., Кожухов Ю.В., Зуев А.В., Лебедев А.А., Карташов С.В.Основы проектирования и расчёта входных и выходных устройств турбокомпрессоров СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016.150 с.
5. Гилева Л.В. Кожухов Ю.В., Юн В.К., Прокопович М.В. Исследование и оптимизация различных форм всасываюзиъ камер центробежного компрессора с использованием методов вычислительной газодинамики с валидацией расчетной модели Материалы научно-практической конференции 30 ноября – 6 декабря 2015 года. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 2. 320 л. 2015. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Кожухов Ю.В., Юн В.К., Прокопович М.В.
6. Гилева Л.В., Кожухов Ю.В. Исследование всасывающей камеры центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики с проверкой модели на сеточную независимость. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. – 276 с. С. 154-157

7. Л.В. Гилева, С.Г. Овчинников. Численное исследование входных камер центробежных компрессоров общего назначения. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем. Ч.1. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 277с.
8. Гилева Л.В., Кожухов Ю.В., Зуев А.В. Совершенствование методики проектирования входных радиальных камер турбокомпрессоров В книге: техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства Материалы 8-й международной научно-технической конференции. 2018. С.

Аспирант _____ Гилева Любовь Васильевна

(подпись)