

На правах рукописи

Новицкий Бронислав Брониславович

**РАЗРАБОТКА УТОЧНЁННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА
ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА
СМЕСЯХ ГАЗОВ**

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

Научный руководитель – **Арбеков Александр Николаевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Каминский Валерий Наумович**
доктор технических наук, профессор кафедры транспортных газотурбинных двигателей ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Федечкин Константин Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-конструктор ПАО «НПО «Сатурн»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Защита состоится 26 апреля 2016 года в 13 часов 45 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Маломощные многоцелевые энергетические установки, предназначенные для электро-, тепло- и холодоснабжения автономных потребителей являются основой развития систем распределенной энергетики, позволяющей избавиться от потерь возникающих при передаче электроэнергии на значительные расстояния, особенно в труднодоступные районы. Для решения указанной проблемы также может быть использована замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе и способная работать на различных рабочих телах, где выбор рабочего тела позволяет оптимизировать проточную часть турбомашин в широком диапазоне мощностей.

Создание ЗГТУ требует отработки ряда критических узлов. Основной трудностью является определение характеристик малоразмерного центробежного компрессора при работе на рабочих телах, отличных от воздуха, что требует создания специального изолированного от атмосферы стендового оборудования. В то же время с развитием современных программных комплексов для численного решения уравнений Навье-Стокса появляется возможность проводить неограниченное количество численных экспериментов, заменяя тем самым дорогостоящие натурные испытания. Однако данный подход требует верификации с реальными экспериментальными данными.

Актуальность работы, определяющая цели и задачи исследования, заключается в необходимости совершенствования замкнутых газотурбинных установок, в том числе путём разработки методики расчёта характеристик центробежного компрессора на различных рабочих телах, минимизируя дорогостоящие натурные испытания.

Цель работы: создание экспериментально обоснованной методики определения характеристик малоразмерного центробежного компрессора, работающего на смесях газов, на базе пакета вычислительной газовой динамики Ansys CFX. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Получены недостающие экспериментальные данные, необходимые для верификации численного расчёта компрессора при работе на различных рабочих телах;
2. Выполнена верификация численного расчёта по результатам экспериментальных исследований ступени компрессора, выбраны сеточные модели и способы замыкания, наиболее адекватно описывающие характеристики ЦБК;
3. Смоделированы в программе Ansys CFX характеристики малоразмерной ступени центробежного компрессора на воздухе, аргоне, гелиексеновой смеси с молярной массой 39,95 кг/кмоль и криптона;
4. Скорректированы одномерные методики, необходимые для оценки характеристик при работе на различных рабочих телах, опираясь на численно и экспериментально полученные данные;

5. Выполнены численные исследования влияния упрощения геометрии на интегральные характеристики малоразмерного ЦБК в программе Ansys CFX.

Научная новизна работы определяется тем, что:

- получены экспериментальные характеристики малоразмерного центробежного компрессора при работе на инертных газах и их смесях;
- создана методика расчёта характеристик малоразмерных центробежных компрессоров на смесях инертных газов;
- получены характеристики малоразмерного центробежного компрессора при работе на смесях инертных газов в результате математического моделирования с применением пакетов вычислительной газовой динамики;
- показана допустимость упрощения геометрии проточной части малоразмерного компрессора, позволяющая сократить время математического моделирования и требования к персональному компьютеру.

Достоверность и обоснованность результатов определяются:

- применением при проведения экспериментальных исследованиях современной, цифровой, системы диагностики, продублированной аналоговыми приборами;
- использованием в процессе выполнения работы наиболее современных, апробированных и научно обоснованных программ и методик численного расчёта трехмерных течений в лопаточных турбомашинах;
- согласованием результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Практическая ценность заключается в следующем:

- экспериментально получены характеристики малоразмерного центробежного компрессора работающего на различных рабочих телах, в том числе с одинаковой молярной массой;
- разработан алгоритм расчёта характеристик малоразмерного центробежного компрессора работающего на инертных газах с различной молярной массой, реализованной в программном комплексе Ansys CFX;
- создана и отлажена в программной среде Visual Basic программа по оценке характеристик малоразмерного центробежного компрессора при работе на различных рабочих телах.

Реализация результатов работы.

Результаты работы используются при проектировании и создании замкнутых газотурбинных установок малой мощности для электро-, тепло- и холодоснабжения автономных потребителей.

Апробация результатов работы. Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2015 г. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011» (Москва, 2011 г.);
- на пятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012 г.);

- на 11-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012» (Москва, 2012 г.);
- на заседании XIX школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газовой динамики и теплообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево, 2013 г.);
- на Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2013 г.);
- на конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (Москва, 2013 г.);
- на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2014 г.);
- на молодёжной научно-практической конференции «ОАО ВНИИГАЗ» (Москва, 2014 г.).

Публикации. Основные положения и выводы изложены в 11 печатных работах, в том числе в 3 Публикациях в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных изданий, определённый ВАК РФ.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании поставленных цели и задач исследования; разработке алгоритма проведения численных исследований характеристик малоразмерного центробежного компрессора при работе на различных рабочих телах; непосредственном участии в планировании и проведении экспериментальных исследований; в обработке и анализе полученных данных; в создании методики оценки характеристик центробежного компрессора; в подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объём диссертации. Квалификационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 123 наименования. Весь материал изложен на 167 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика работы и приведены основные защищаемые положения.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической информации по теме исследования; проведён анализ существующих подходов к проектированию центробежных компрессоров; проанализированы вопросы пересчёта характеристик центробежного компрессора на различные рабочие тела; рассмотрены вопросы оценки характеристик центробежного компрессора с помощью различных одномерных методик; выполнен анализ применяемых методик по расчёту характеристик ЦБК с применением вычислительной газовой динамики.

Исходя из проведённого анализа литературных данных с учётом поставленной цели сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена проведению численных исследований влияния моделей турбулентности, сеточных моделей и упрощения геометрии проточной части на точность получаемых характеристик малоразмерного центробежного компрессора. Выработан алгоритм выполнения численных расчётов с помощью программ вычислительной газовой динамики (ANSYS CFX). Расчётная геометрия представлена на Рис. 1. Исследования малоразмерного центробежного компрессора проводились при использовании различных способов замыкания системы уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу ($k-\omega$, $k-\varepsilon$, $RNG\ k-\varepsilon$, Spalart-Allmaras и $k-\omega\ SST$). На Рис. 2 и Рис. 3 представлено сравнение картин течения воздуха в проточной части ступени центробежного компрессора при использовании модели турбулентности $k-\varepsilon$ и $k-\omega\ SST$.

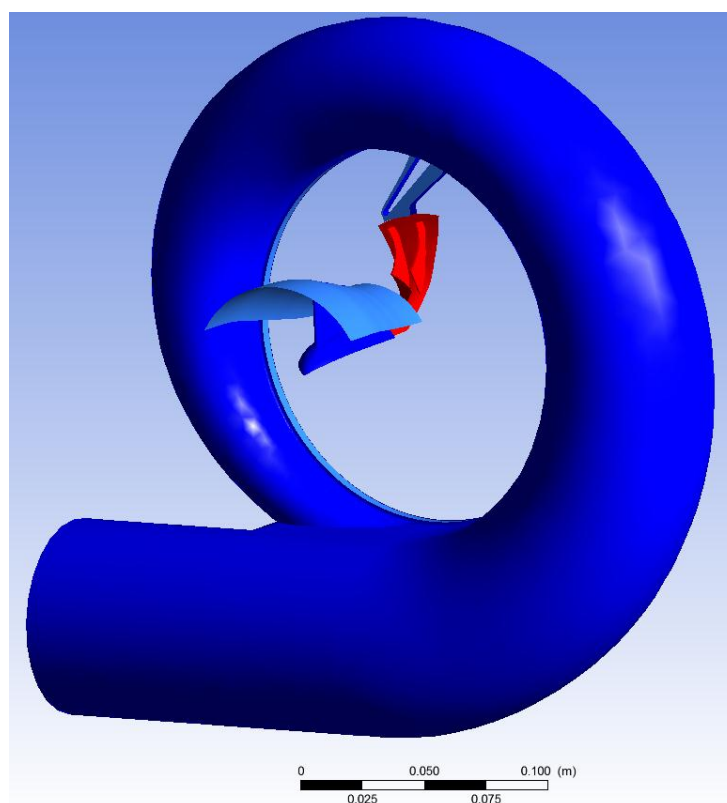


Рис. 1.

Расчётная зона малоразмерного центробежного компрессора

По характеру течения видно (Рис. 2, а), что на рабочей лопатке со стороны «разрежения» нет отрыва, в то время как модель турбулентности $k-\omega\ SST$ показывает отрыв. Это можно объяснить использованием высокорейнольдсовой моделью турбулентности $k-\varepsilon$ пристеночных функции, которые «отодвигают» поток от стенки, что ведёт к невозможности вывода векторов скоростей у стенки.

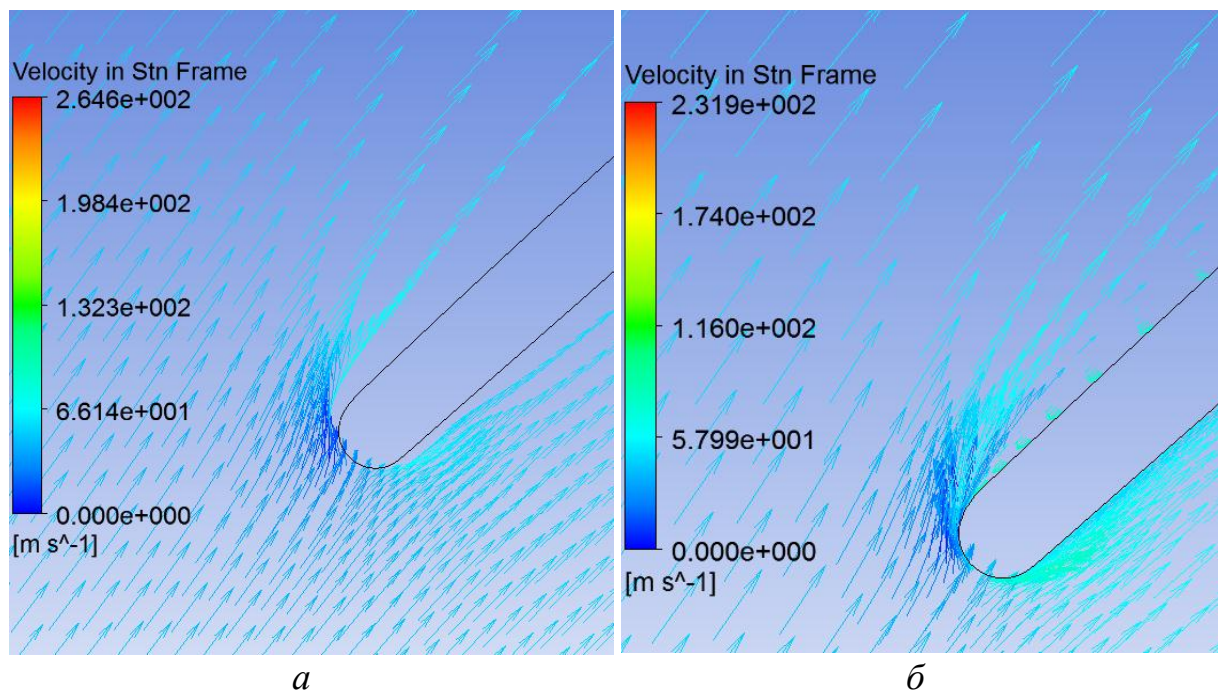


Рис. 2.

Натекание потока на кромку рабочего колеса компрессора при расходе воздуха $G=109$ г/с и частоте вращения 30000 мин⁻¹ при моделировании на модели турбулентности $k-\varepsilon$ (а) и $k-\omega$ SST (б)

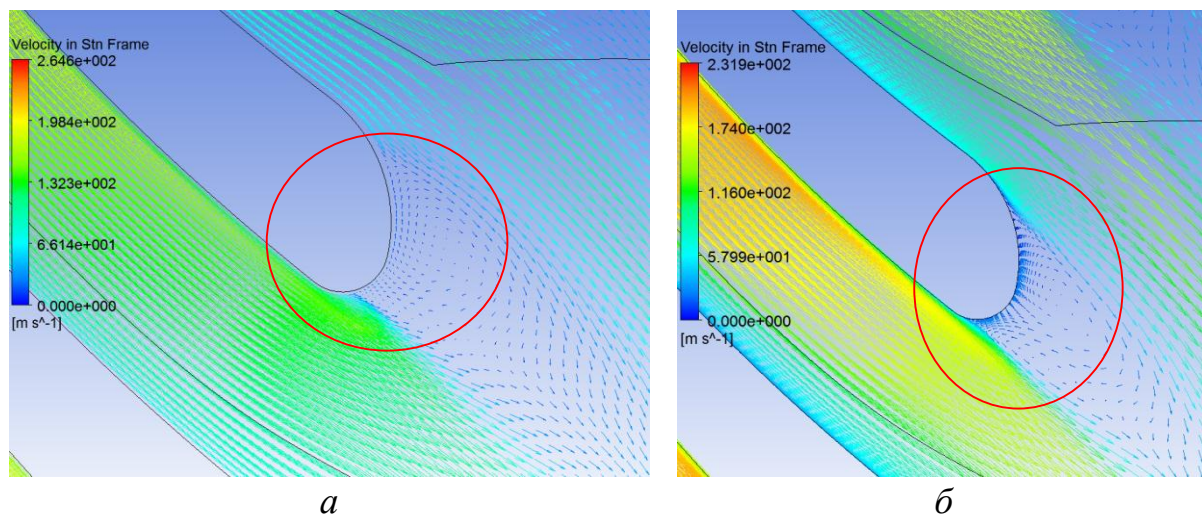


Рис. 3.

Картина течения за лопаточным диффузором при использовании модели турбулентности $k-\varepsilon$ (а) и $k-\omega$ SST (б)

В работе выполнено сравнение пространственной эпюры безразмерных меридиональных скоростей, полученной экспериментально А.Ф. Куфтовым на крупномасштабном стенде центробежного компрессора кафедре ЭЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана, с результатами численного моделирования в ANSYS CFX при расчётах с различными моделями турбулентности (Рис. 4).

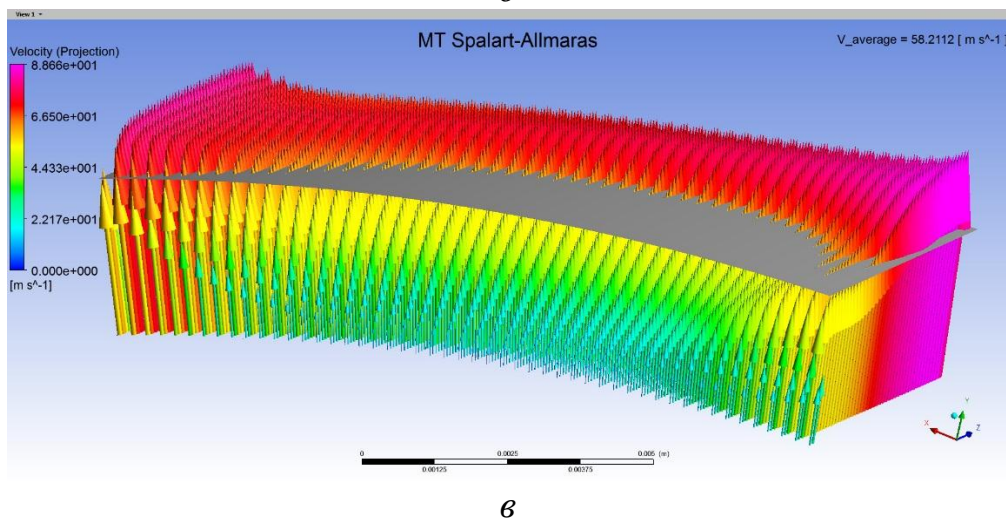
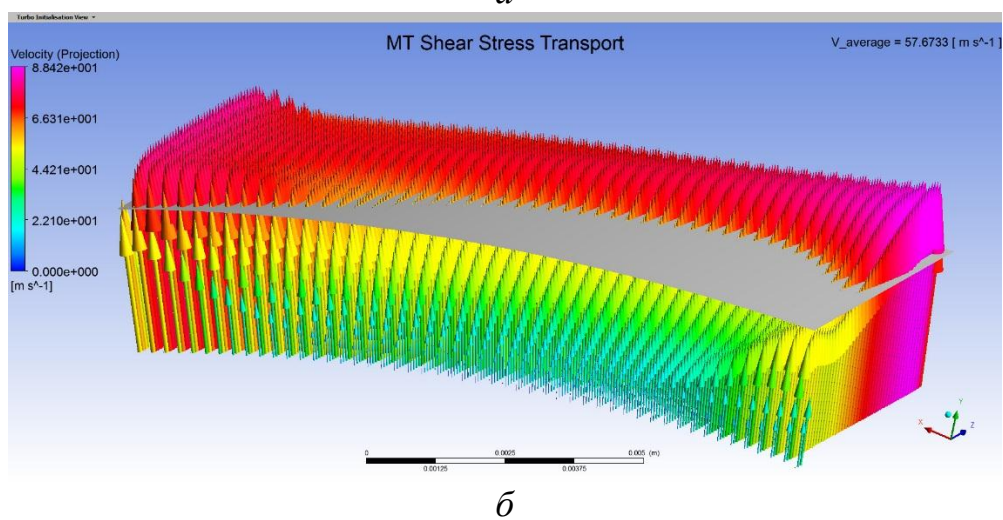
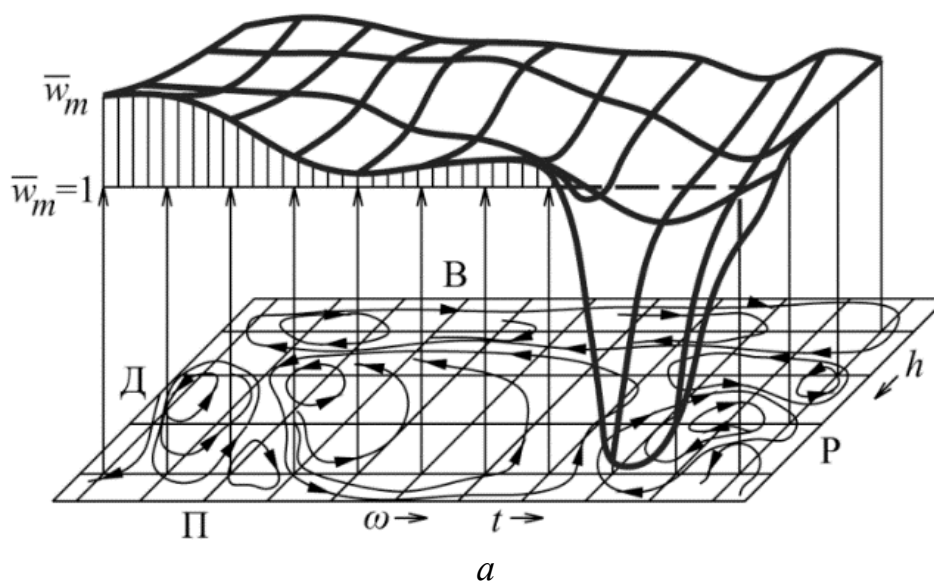


Рис. 4.

Сравнение пространственной эпюры безразмерных меридиональных скоростей полученных экспериментально (a) и с помощью численных методов при моделировании на модели турбулентности $k - \omega SST$ (b) и Spalart-Allmaras (c)

У лопатки рабочего колеса вблизи стороны разрежения на периферии существует зона с резким провалом скорости (Рис. 4, а), которая между лопаток (у периферии) полностью исчезает (происходит выравнивание скоростей), что вызвано сильными вторичными течениями в рабочем колесе центробежного компрессора. При моделировании на различных моделях турбулентности ($k-\omega$, $k-\varepsilon$, $RNG\ k-\varepsilon$, Spalart-Allmaras и $k-\omega\ SST$), зона с «провалом» скорости располагается у периферии в середине межлопаточного канала, существенно отличаясь от экспериментальных данных, где провал скорости наблюдается вблизи лопатки на стороне разрежения. Следовательно, ни одна из представленных моделей турбулентности не описывает в полной мере вторичные течения в проточной части рабочего колеса, а следовательно данные способы замыкания вносят дополнительную погрешность в определении характеристик центробежного колеса.

При расчёте компрессора с применением модели турбулентности $k-\omega\ SST$ выявлено влияние размерности и типа сеточной модели на характеристики ЦБК, показавшее, что увеличении размерности структурированной сетки рабочего колеса свыше 929 тыс. элементов практически не ведёт к изменению получаемых характеристик (при сохранении безразмерной пристеночной координаты $y^+ < 2$). А применение неструктурированных сеточных моделей значительно снижает степень повышения давления и к.п.д. компрессора, даже при высокой размерности (свыше 3,6 млн.). Установлено влияние наличия галтелей на результаты расчётов, где разница в области низких расходов, то есть вблизи расчётных режимов, по степени повышения давления составила не более 0,5%, а разница по к.п.д. не более 1 % (Рис. 5). Удаление галтелей позволило существенно снизить требования ко временным и вычислительным ресурсам персонального компьютера.

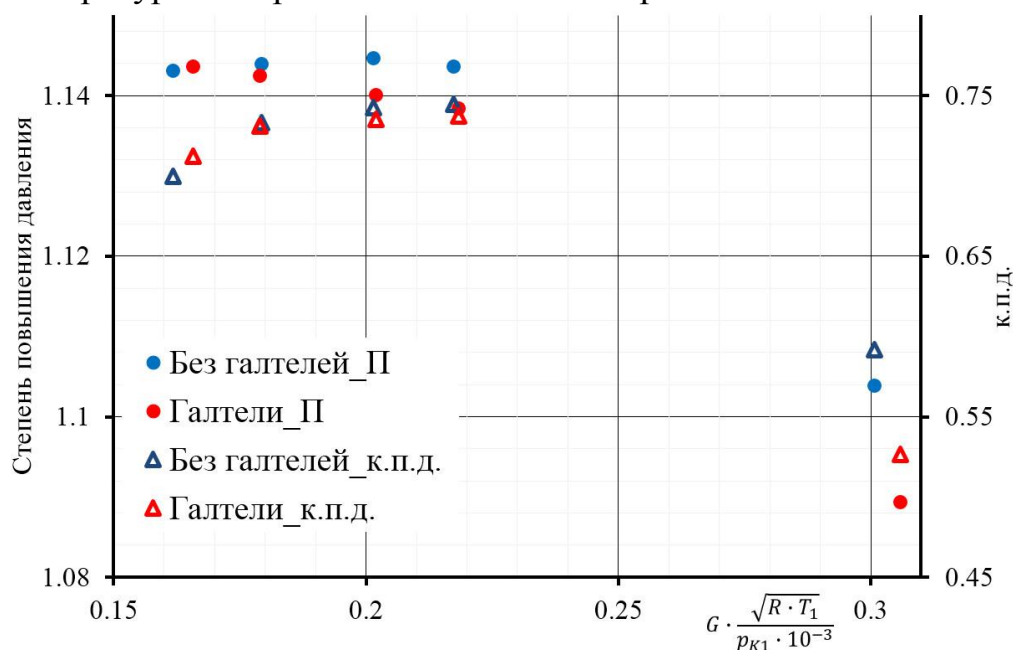


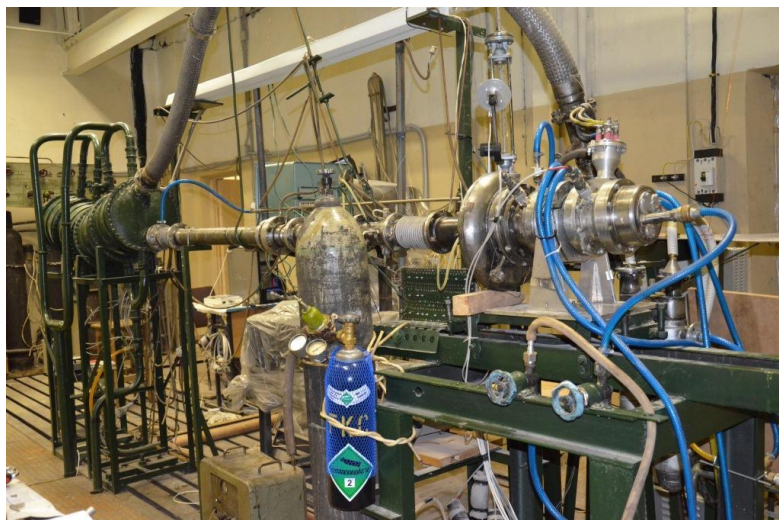
Рис. 5.

Изменение характеристик малоразмерного центробежного компрессора при удалении галтелей при частоте вращения $30\,000\text{ мин}^{-1}$

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям характеристик малоразмерного центробежного компрессора (Рис. 6, а). Представлено описание стенда и измерительного оборудования по экспериментальному определению характеристик компрессоров (Рис. 6, б). Схема представлена на Рис. 7.



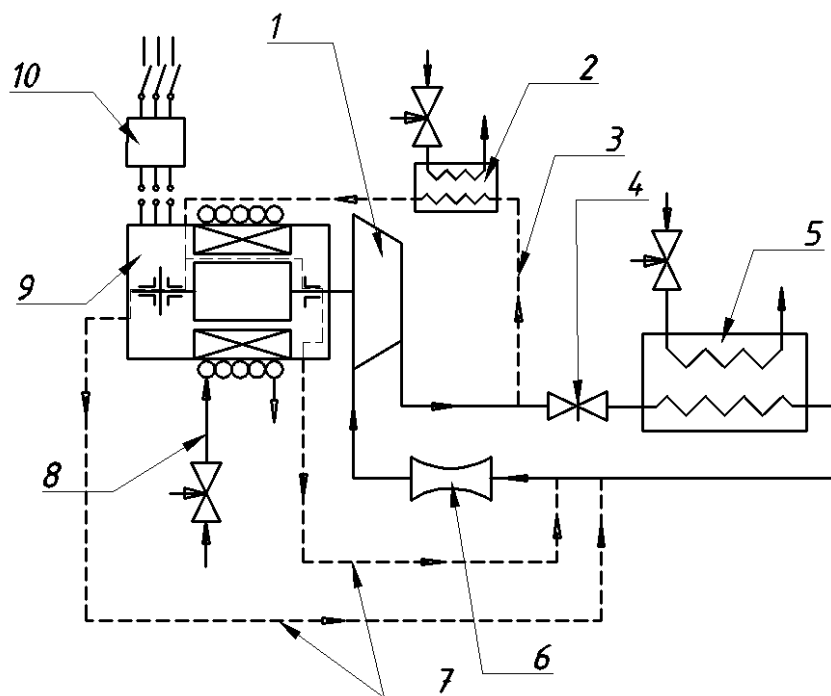
а



б

Рис. 6.

Малоразмерный центробежный компрессор (а) и экспериментальный стенд (б)



1 – ступень ЦБК;
2 – вспомогательный охладитель газа; 3, 7 – байпасные трубопроводы; 4 – дроссельная заслонка; 5 – конечной охладитель; 6 – сопло Вентури; 8 – жидкостная система охлаждения статора электродвигателя; 9 – электродвигатель; 10 – регулируемый статический преобразователь.

Рис. 7.

Принципиальная схема стенда для экспериментального исследования

Герметичный газовый контур стенда организован собственно ступенью компрессора (1 на Рис. 7), дроссельной заслонкой (4 на Рис. 7), установленной при выходе из улитки компрессора и регулирующей сопротивление тракта, конечного газожидкостного холодильника (5 на Рис. 7), предназначенного для отвода теплоты из контура, трубопроводов газового контура, сопла Вентури (6 на Рис. 7), необходимого для измерения расхода, системы вакуумирования и наполнения контура. Охлаждающая жидкость поступает в конечной холодильник и рубашку охлаждения электродвигателя через регулирующие клапаны. Для обеспечения исследований характеристик в широком диапазоне в качестве привода используется электропривод. Поэтому стенд для испытания ступеней центробежных компрессоров малоразмерных ЗГТУ включает в себя статический частотный преобразователь мощностью 45 кВт (10 на Рис. 7), необходимый для питания высокочастотного высокоскоростного трехфазного синхронного электродвигателя с ротором на постоянных самарий-кобальтовых магнитах с жидкостным охлаждением, который приводит во вращение рабочее колесо центробежной ступени.

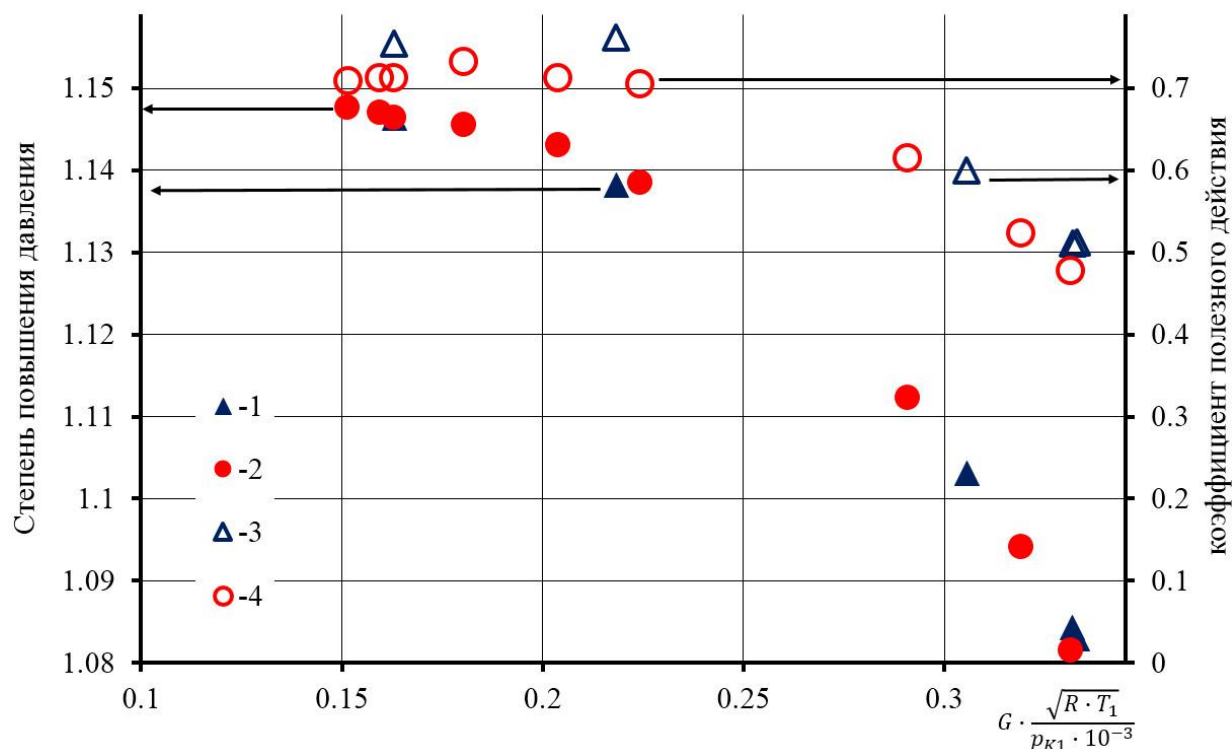


Рис. 8.

Результаты экспериментальных исследований компрессора при работе на воздухе при частоте вращения 30000 мин⁻¹: 1 – Степень повышения давления ЦБК в эксперименте №1; 2 – Степень повышения давления ЦБК в эксперименте №2; 3 – коэффициент полезного действия в эксперименте №1; 4 – коэффициент полезного действия в эксперименте №2.

Перед проведением экспериментов выполнено тестирование измерительного оборудования (преобразователей давления) на гистерезис, а также

проведена тарировка всех датчиков и термопар. На Рис. 8 представлены результаты экспериментальных исследований характеристик при работе компрессора на воздухе.

Экспериментальные исследования при работе компрессора на воздухе проводились при постоянной частоте вращения ($30\,000\text{ мин}^{-1}$) и изменении сопротивления тракта, крайняя левая точка на характеристике (Рис. 8) соответствует началу помпажа. На Рис. 9 представлены результаты экспериментальных исследований характеристик компрессора на аргоне и геликсеноновой смеси с молярной массой $39,95\text{ кг/кмоль}$.

Таблица 1.

Расчётные характеристики ступени ЦБК на различных рабочих телах

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Рабочее тело		
			Криптон	Аргон	Воздух
Показатель адиабаты	k	-	5/3	5/3	7/5
Молярная масса	m	кг/кмоль	83,800	39,944	28,960
Газовая постоянная	R	Дж/(кг·К)	99,210	208,153	287,20
Вязкость при н.у. (273 К)	μ	$1 \cdot 10^{-5}$ Па·с	2,344 (2,310)*	2,083 (2,471)*	1,71
Частота вращения	n	1/мин	40000	57939	66906
Расход	G	кг/с	0,322	0,222	0,252
Окружная скорость РК	U_2	м/с	188,50	272,99	315,29

* - для геликсеноновой смеси.

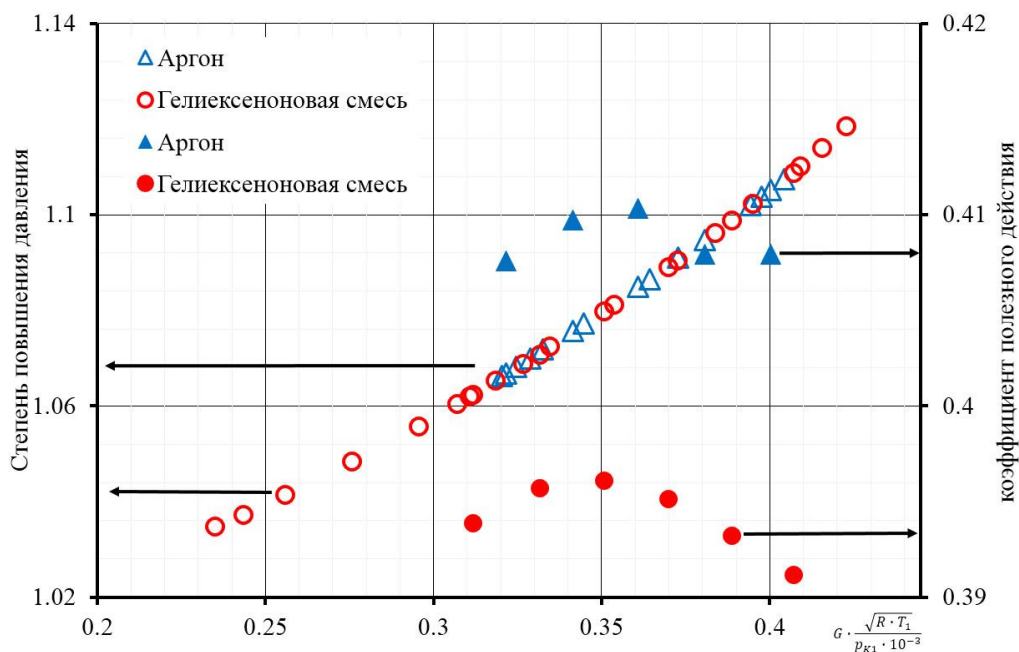


Рис. 9.

Результаты экспериментальных исследований компрессора при работе на аргоне и геликсеноновой смеси с молярной массой $39,95\text{ кг/кмоль}$

Исходя из полученных экспериментальных данных видно, что напорная характеристика на аргоне лежит выше и правее, чем на гелиексеновой смеси. К.п.д. на аргоне тоже лежит выше (на 2%). Это объясняется различной вязкостью рабочих тел (Таблица 1). Однако данное расхождение укладывается в погрешности измерений, которые составили 5% по расходу, 1% по напору и 6% по к.п.д.

Четвёртая глава посвящена численным исследованиям характеристик малоразмерного центробежного компрессора.

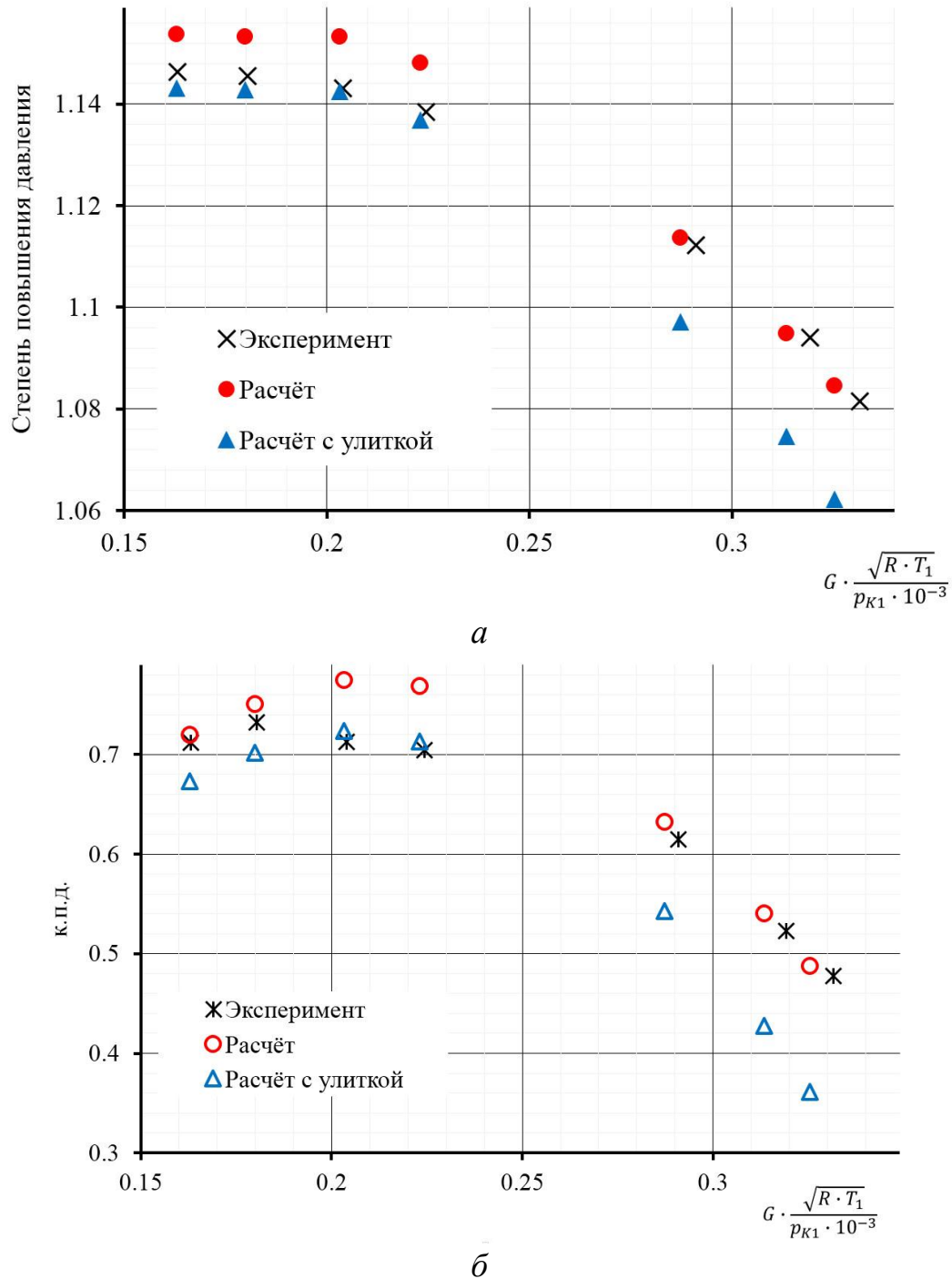


Рис. 10.

Сравнение степени повышения давления (а) и к.п.д. (б) результатов эксперимента с численным расчётом

Проведена верификация различных моделей турбулентности с результатами экспериментальных исследований, показавшее, что наиболее адекватные интегральные характеристики показывает $k-\omega$ SST модель турбулентности. Следующим этапом было определение влияния доменов входящих в расчётную зону и структуры сеточной модели на результаты моделирования. На Рис. 10 представлено сравнение численного моделирования выполненного при наличии и отсутствии компрессорной улитки на воздухе.

Аналогичные сравнение были проведены и на аргоне, в качестве рабочего тела (Рис. 11).

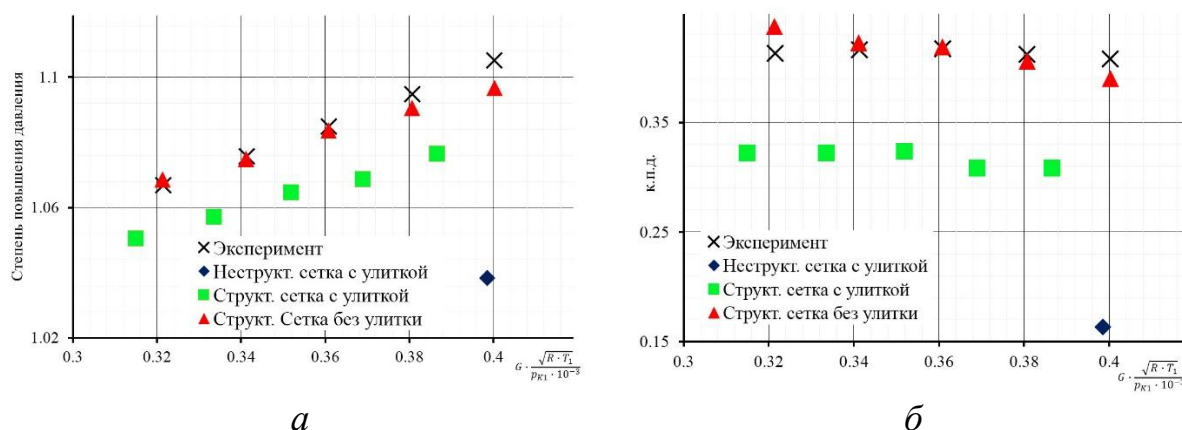


Рис. 11.

Сравнение степени повышения давления (а) и к.п.д. (б) результатов эксперимента с численными данными при различной постановке граничных условий при работе компрессора на аргоне

На Рис. 11 видно, что наибольшее совпадение характеристик компрессора при работе на аргоне показывает расчётная зона без компрессорной улитки, однако в зоне с низкими расходами (вблизи рабочей зоны компрессора) наиболее близкие характеристики получены при расчётах вместе с улиткой. Следовательно, характеристики ступени компрессора вблизи расчётной точки адекватнее описывает расчётная область состоящая из всех доменов, входящих в ступень (Рис. 10). Разница по степени повышения давления не превышает 0,3 %, а по к.п.д. 5 %. Однако наличие улитки существенно увеличивает вычислительные и временные ресурсы, поэтому для облегчения выполнения расчётов на Рис. 12 представлена зависимость коэффициента сохранения полного давления от приведённого расхода при входе в улитку на воздухе, аргоне и криптона в качестве рабочего тела, и применение данного коэффициент позволяет в расчёте учитывать улитку, проводя расчёт без неё.

На основе полученных данных было выполнено численное моделирование характеристик малоразмерного центробежного компрессора с помощью ANSYS CFX с применением модели турбулентности $k-\omega$ SST (рис. 13 и 14). На Рис. 13 отчётливо прослеживается, что изменение рабочего тела с аргона на геликсеноновую смесь с молярной массой 39,95 кг/кмоль (молярная

масса аргона) практически не влияет на характеристики малоразмерного центробежного компрессора.

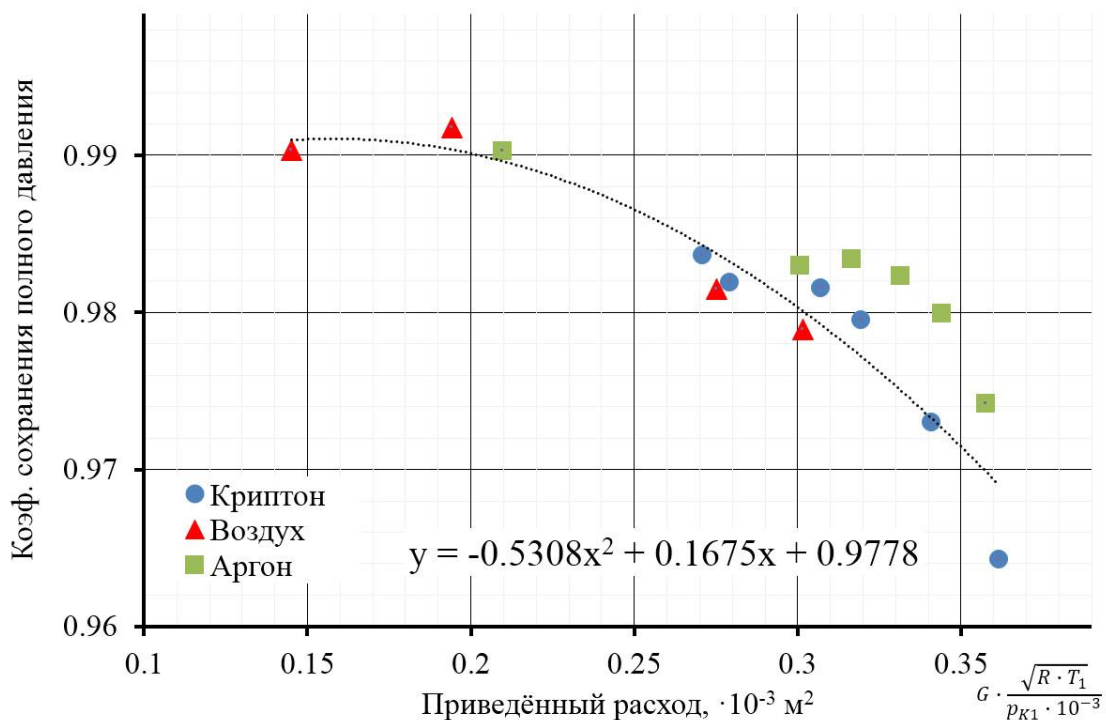


Рис. 12.

Зависимость коэффициента сохранения полного давления в улитки от расходной скорости при входе

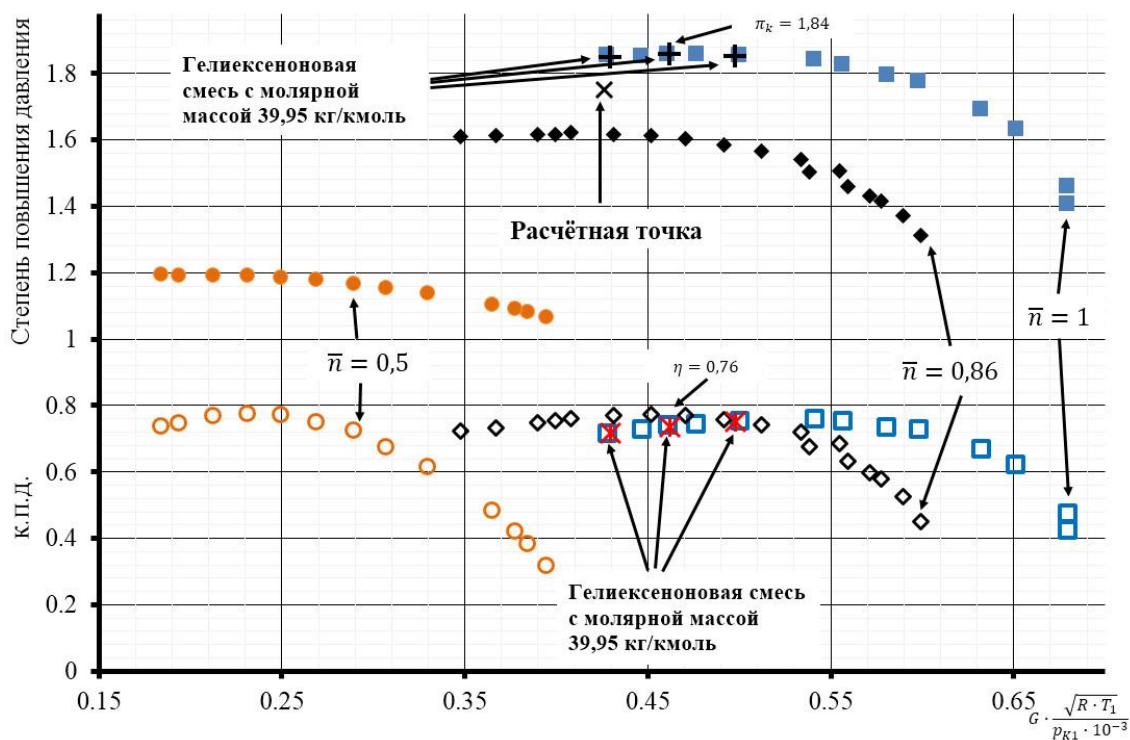


Рис. 13.

Результаты численного моделирования характеристик ЦБК при работе на аргоне и геликсеновой смеси с молярной массой 39,95 кг/кмоль

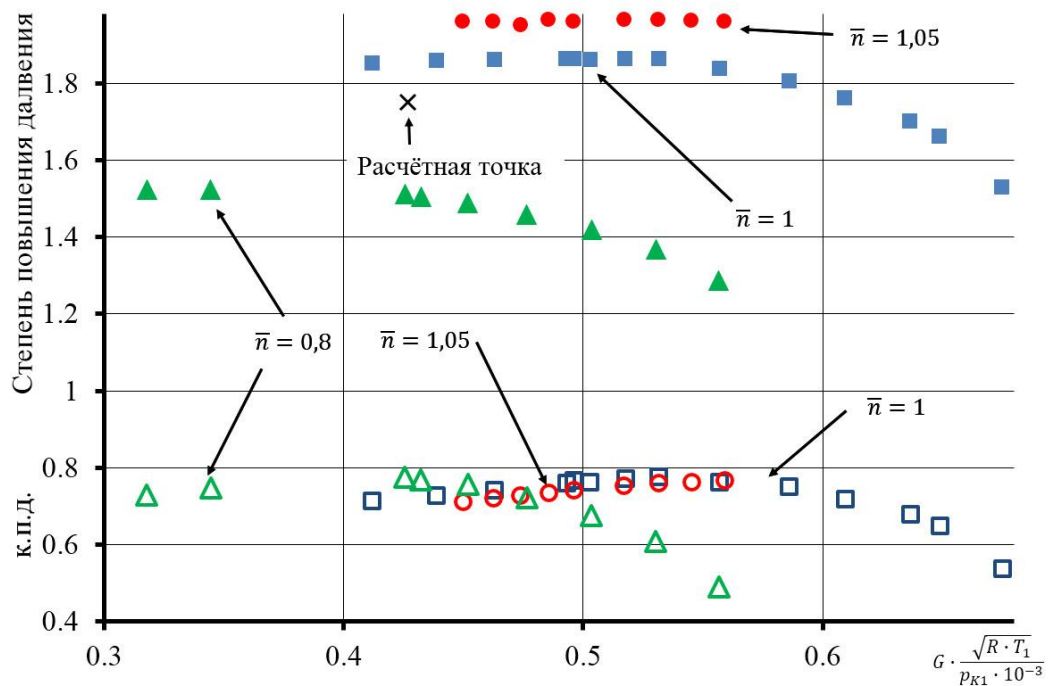


Рис. 14.

Результаты численного моделирования характеристик ЦБК при работе на криптоне

На основе экспериментальных и численных исследований была написана программа «BMSTU_GALVAS» с помощью Visual Basic for Application на основе методики Галваса. Результаты верификации при работе на криптоне представлены на Рис. 15, которые показывают, что программа «BMSTU_GALVAS» позволяет оценить точку начала помпажа с точностью до 7% (по расходу) при относительной частоте вращения равной 1. При расходе вблизи расчётного точность степени повышения давления составляет 3%, а к.п.д. 4% при номинальной частоте вращения $\bar{n}=1$. Сравнение характеристик ЦБК при работе на аргоне представлены на Рис. 16.

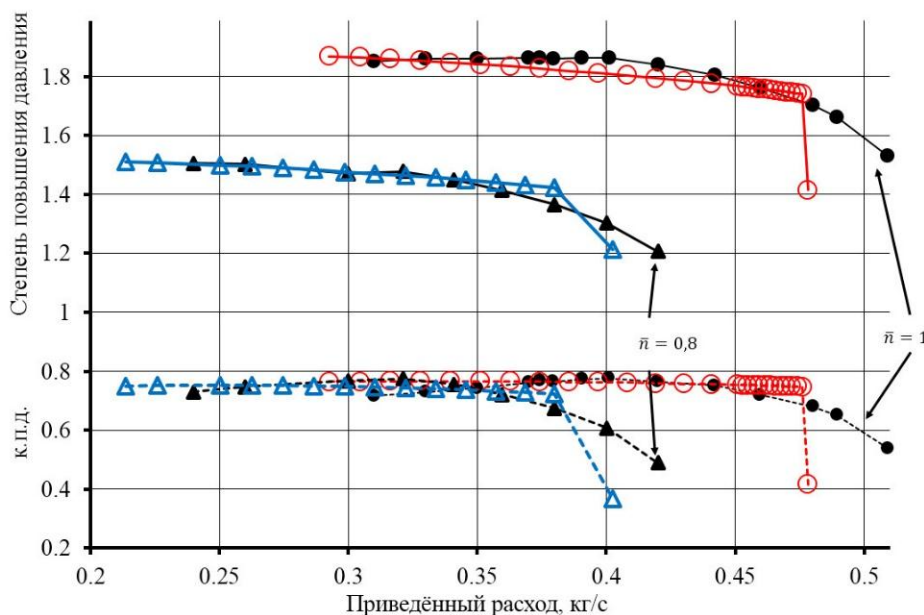


Рис. 15.

Сравнение характеристик ЦБК полученных с помощью численного моделирования и одномерного расчёта при работе на криптоне.

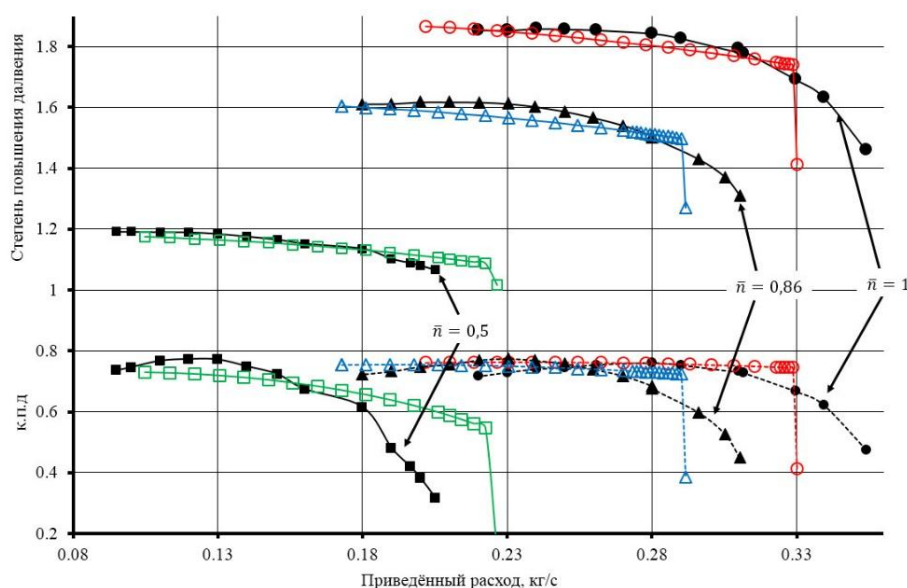


Рис. 16.
Сравнение ха-
рактеристик
ЦБК получен-
ных с помо-
щью числен-
ного моделиро-
вания и одно-
мерного рас-
чёта при ра-
боте на аргоне.

Основные результаты и выводы

На основе проведённых экспериментально-теоретических исследований малоразмерного центробежного компрессора можно сделать выводы.

1. Экспериментально получены характеристики ступени малоразмерного центробежного компрессора при работе

- на воздухе при частоте вращения $30\,000\text{ мин}^{-1}$ и варьировании приведённого расхода $(1,6 \dots 3,3) \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$;

- на аргоне и гелиексеновой смеси с молярной массой $39,95\text{ кг/кмоль}$ при частоте вращения в диапазоне $(18 \dots 33) \cdot 10^3\text{ мин}^{-1}$ и приведенных расходах $(2,5 \dots 4,2) \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$;

2. Выполнена верификация характеристик малоразмерного центробежного компрессора при численном моделировании с применением $k - \omega$ SST способа замыкания системы уравнений Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу;

3. Получены характеристики ступени малоразмерного центробежного компрессора при работе на аргоне, криптоне и гелиексеновой смеси в результате математического моделирования в программной среде ANSYS CFX;

4. Создана методика расчёта характеристик малоразмерного центробежного компрессора при работе на различных рабочих телах, на основе результатов численных и экспериментальных исследований;

5. Показано, в результате численных исследований, что упрощение геометрии проточной части рабочего колеса компрессора приводит к некоторому завышению интегральных характеристик центробежного компрессора в области максимального напора, но существенно снижает требуемые вычислительные ресурсы.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальные исследования характеристик малоразмерного центробежного компрессора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 8. С. 491-504. URL. <http://technomag.bmstu.ru/doc/432308.html>. (0,75 п.л./0,3 п.л.).
2. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование малорасходного центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки // Вестник СГАУ им. С.П. Королёва. 2014. № 5 (47). ч.2. С. 42-48. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
3. Новицкий Б.Б. Сравнение методов замыкания при моделировании течения в малоразмерном центробежном компрессоре // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 67-82. URL. <http://technomag.bmstu.ru/doc/778604.html>. (0,8 п.л.).
4. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Определение характеристик малоразмерного центробежного компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. №7. С. 111-119. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
5. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Исследование характеристик малорасходного центробежного компрессора на смесях инертных газов // Авиация и космонавтика – 2011: Тез. докл. Международной конф. Москва. 2011. С.147. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
6. Егоров К.С., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // Будущее машиностроения России: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2012. С. 164. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
7. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора на смесях инертных газов // Авиация и космонавтика – 2012: Тез. докл. Международной конф. Москва. 2012. С. 209. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
8. Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // XIX школа-семинар молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Тез. докл. Всерос. конф. 2013. Орехово-Зуево. С. 189. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
9. Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование малорасходного центробежного компрессора // Будущее машиностроения России: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2013. С. 190-191. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
10. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование малорасходного центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Тез. докл. Международной конф. Самара. 2014. С. 254-255. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
11. Новицкий Б.Б. Моделирование центробежного компрессора автономной газотурбинной установки мощностью 1-3 кВт // Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2014. С. 23. (0,1 п.л.).