

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи



Барсков Виктор Валентинович

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ
МАЛОГАБАРИТНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С НЕЗАВИСИМЫМ
СООТНОШЕНИЕМ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ ТУРБИНЫ И
КОМПРЕССОРА

Специальность – 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель
Рассохин Виктор Александрович
проф., д.т.н.

Санкт-Петербург
2017 год

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Рассохин Виктор Александрович доктор технических наук, профессор, кафедра «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

Хоменок Леонид Арсеньевич доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе - заведующий отделением турбинных установок ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург.

Харисов Ирек Саитгалиевич

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по производству, ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет» Московский энергетический институт», Россия, г. Москва.

Защита состоится «25» апреля 2017г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «____» _____ 2017г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.06, кандидат технических наук, доцент



Талалов Виктор Алексеевич

Актуальность работы. Многообразие потребителей энергии и требований к виду и качеству энергообеспечения, заставляет по-новому взглянуть на роль автономных энергетических агрегатов малой мощности (от десятков киловатт до нескольких мегаватт) в общей структуре энергетики. В условиях современной государственной политики и курса экономики на импортозамещение, в ближайшей перспективе серьезное внимание следует уделить сооружению отечественных, относительно дешевых автономных энергетических установок (АЭУ) малой мощности различного назначения, финансирование которых возможно, как из местных бюджетов, так и за счет инвестиций частного капитала.

В связи с актуальностью поставленных задач по развитию автономной энергетики и высокой востребованностью их на рынке локальных источников электрической и тепловой энергии, необходимо выполнить комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку и создание микротурбинных генераторов, построенных на нетрадиционных компоновках и кинематических схемах. В зарубежной и отечественной литературе такие установки называют малогабаритные газотурбинные установки (МГТУ). МГТУ – это автономная тепловая электростанция малой мощности. МГТУ имеет минимальную электрическую мощность от нескольких киловатт до 500 кВт. МГТУ – это электростанция с очень низким уровнем вредных выбросов. МГТУ не требует больших расходов на эксплуатацию и обслуживание. МГТУ легко объединяются в кластер - единую энергетическую систему. Кластер из МГТУ позволяет вырабатывать значительную мощность - до 10 МВт. В режиме когенерации МГТУ способны успешно решать задачи теплоснабжения различных объектов.

Преимущества малогабаритных газотурбинных установок (МГТУ). Заключаются в возможности работы в течение длительного времени при низких нагрузках, низком уровне выбросов NO_x , низком уровне вибраций и шума, работе без смазок и моторного масла, низкой стоимости эксплуатационных расходов, длительном ресурсе до капитального ремонта, возможности работы на различных

видах топлива, высокой надежности. Все вышесказанное определяет высокую актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Конструктивные особенности малогабаритных газотурбинных установок: высокие частоты вращения, минимальное использование дорогостоящих материалов, длительная работа на частичных нагрузках, блочное исполнение.

Области использования малогабаритных газотурбинных установок: промышленные предприятия, медицинские учреждения, жилищные коттеджи, бизнес-центры и другие объекты крупных городов, в том числе Санкт-Петербурга, магистральные газопроводы, газораспределительные станции и нефтепроводы нуждающиеся в энергообеспечении для нормального функционирования, мобильные источники электрической и тепловой энергии для нужд МЧС, предприятия по переработке бытовых отходов, малые города, коттеджные поселки и деревни, во многих из которых до сих пор не решен вопрос централизованного теплоэнергоснабжения, крупные животноводческие фермы, предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции. Предприятия лесозаготовительной промышленности, поисковые партии газовиков, геологов и др., энергодефицитные районы Крайнего Севера, Дальнего Востока, некоторые районы Нечерноземья, резервирование линий электропередач, питающих ответственных потребителей энергии, а также восполнение дефицита электроэнергии, вызванного стихийными или другими чрезвычайными ситуациями.

Эффективность использования малогабаритных газотурбинных установок определяется низкой себестоимостью производства электроэнергии и тепла при использовании совершенного оборудования, высокой надежностью энергоснабжения, существенным сокращением сроков их сооружения, независимостью режима работы от загруженности энергосистемы, уменьшением отчуждения территории под крупное энергетическое строительство, повышением экологичности производства электроэнергии и тепла, снижением затрат на охрану

окружающей среды, применением перспективных современных технологий и технических решений при создании новой техники.

Особенностью эксплуатации являются: тяжелые климатические условия, низкая квалификация обслуживающего персонала, простота монтажа (под «ключ») и демонтажа, высокая степень автоматизации, дистанционное управление, возможность объединения в единую энергетическую систему. В режиме избытка тепловой энергии, МГТУ можно использовать для теплоснабжения объектов.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка принципов построения многорежимных малогабаритных газотурбинных установок с оптимальным соотношением частот вращения малорасходного центробежного компрессора и малорасходной турбины радиально-осевого типа, что позволит получить установку с характеристиками близкими к характеристикам лучших зарубежных аналогов, а по некоторым параметрам превышающих их.

Задачи, решаемые в диссертационной работе:

- подготовить методологическое обеспечение для исследования тепловых схем малогабаритных газотурбинных установок;
- выполнить параметрическую оптимизацию, на основании которой провести выбор оптимальных параметров и характеристик малогабаритной газотурбинной установки;
- создать исследовательскую базу и технологическое оборудование;
- подготовить методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных;
- провести эксперименты по определению основных характеристик проточных частей компрессоров и турбин;
- разработать рекомендации для построения конструктивной схемы перспективных малогабаритных газотурбинных установок.

Научная новизна. Предложено разделение частот вращения ротора компрессора и ротора турбины с оптимальным соотношением. Оптимальная

частота вращения ротора компрессора в диапазоне 33000...63000 об/мин. и ротора турбины в диапазоне 30000...60000 об/мин. Предложена модифицированная методика оценки вырабатываемых мощностей турбины при различных частотах вращения от 30000 до 60000 об./мин. Получены экспериментальные характеристики модельных турбины и компрессора, подтверждающие модифицированные методики расчета этих узлов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложена тепловая схема и компоновка МГТУ с оптимальными значениями частот вращения роторов МЦК и МРТ. Модифицированы методики проведения и обработки экспериментальных данных. Сформулирован конструктивный облик МГТУ. Даны рекомендации по проектированию МГТУ рассматриваемого класса для нужд различных областей народного хозяйства России.

Методология и методы исследования. Методологические и теоретические основы исследования составляют научные труды: И.И. Кириллова, Ю.Б. Галеркина, В.А. Рассохина и других сотрудников кафедр СПбПУ, а также труды отечественных и зарубежных авторов в области турбомашин. Методы исследования включают в себя применение и модернизацию методик расчета различных газодинамических параметров турбомашин, методик оценки неопределенности при испытаниях, так и методик проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту. Разделение частот вращения ротора компрессора и ротора турбины с оптимальным соотношением в предложенной тепловой схеме с приводом компрессора от отдельного электродвигателя, оптимальная частота вращения ротора компрессора в диапазоне 33000...63000 об/мин. и ротора турбины в диапазоне 30000...60000 об/мин.

Модифицированная методика для анализа различных режимов работы малорасходной турбины радиально-осевого типа и малорасходного центробежного компрессора при различных частотах вращения роторов в предложенной тепловой схеме с приводом компрессора от отдельного электродвигателя.

Экспериментальные характеристики модельной турбины и компрессора, подтверждающие модифицированные методики расчета этих узлов в предложенной тепловой схеме с приводом компрессора от отдельного электродвигателя.

Степень достоверности и апробации результатов. Обеспечена использованием в процессе выполнения работы, в качестве базовых, наиболее современных апробированных и тестированных методик на основе накопленных экспериментальных данных и численного анализа основных элементов турбогенераторов. Проведением экспериментальных и натурных исследований по апробированным и научно обоснованным методикам на оборудовании, прошедшем метрологическую аттестацию, с применением современных измерительных приборов и аппаратуры с минимальными погрешностями измерений, обработки опытных данных с использованием устойчивых методов статистического анализа и совпадении результатов тестовых опытов с наиболее надёжными результатами других исследований.

Личный вклад автора. Проведена разработка и научно-техническое обоснование малогабаритной газотурбинной установки с оптимальным соотношением частот вращения малорасходной турбины радиально-осевого типа и малорасходного центробежного компрессора.

Проведена разработка, создание и отладка исследовательской базы, технологического оборудования для проведения натурных испытаний по определению основных характеристик проточных частей малорасходной турбины радиально-осевого типа и малорасходного центробежного компрессора.

Проведены экспериментальные исследования, получены, обработаны и проанализированы опытные данные проточной части малорасходной турбины радиально-осевого типа и проточной части малорасходного центробежного компрессора.

Краткое содержание работы. Глава 1. Проведен обзор и анализ современного состояния теоретических и экспериментальных работ по созданию МГТУ. На основании обзора были разработаны требования к рассматриваемым

установкам. МГТУ должна обладать высоким КПД преобразования энергии топлива в электрическую энергию, в зависимости от выбранной тепловой схемы и ее применения. МГТУ должна оказывать минимальную экологическую нагрузку на окружающую среду - выбросы NO_x менее 7_{ppm} при использовании в качестве топлива природного газа. МГТУ должна работать безупречно при неравномерных нагрузках, включая длительную работу, с мощностью обеспечивающую собственные нужды МГТУ без какого-либо снижения ресурса. МГТУ должна иметь воздушное охлаждение, которое позволит повысить надежность турбомашин и удешевить ее эксплуатацию. МГТУ должна иметь современную цифровую систему управления, которая отслеживает все ключевые параметры и не требует постоянного присутствия, а мониторинг осуществляется с помощью удаленного доступа через мобильную телефонную (SMS) или спутниковую связь.

Для достижения поставленной цели, необходимо использовать комплекс новых технических решений, не применявшихся ранее в отечественной энергетике. Новые технические решения позволят выполнить вышеуказанные требования к малогабаритным газотурбинным установкам и обеспечат их широкое внедрение. К таким решениям относится применение отдельных валов для турбины и компрессора, высокоскоростного синхронного генератора, высокоскоростного синхронного двигателя (более 50000 об/мин), газодинамических лепестковых подшипников, высокоэффективных малорасходных радиально-осевых турбин, высокоэффективных малорасходных центробежных компрессоров.

Глава 2. Рассмотрены наиболее распространенные тепловые схемы МГТУ и предлагаемые двухвальные МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя с и без рекуперации (Рисунки 1,2). Проведен анализ способов повышения $\eta_{\text{МГТУ}}$ для цикла предлагаемой тепловой схемы. Преимуществом предложенной тепловой схемы является возможность выбора оптимального числа оборотов МЦК за счет электронного управления электродвигателем и оптимального числа оборотов МРТ за счет соответствующей подачи топлива.

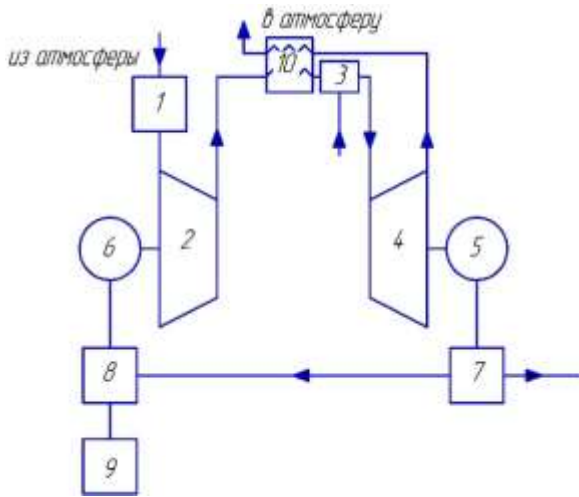


Рисунок 1 Предлагаемая тепловая схема МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя с рекуперацией ($\pi_k^* = 3,5$). 1 – Комплексное воздухоочистительное устройство; 2 – Компрессор; 3 – Камера сгорания; 4 – Турбина; 5 – Генератор; 6 – Электродвигатель; 7 – Блок силовой электроники генератора; 8 – Блок силовой электроники электродвигателя и пусковое устройство; 9 – Аккумуляторы; 10 – Рекуперативный воздухоподогреватель.

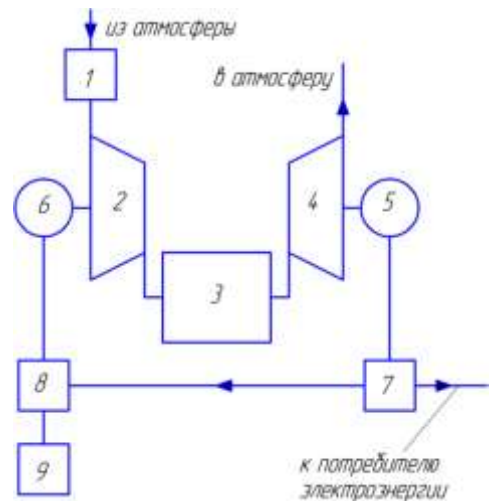


Рисунок 2 Предлагаемая тепловая схема МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя без рекуперации ($\pi_k^* = 12$). 1 – Комплексное воздухоочистительное устройство; 2 – Компрессор; 3 – Камера сгорания; 4 – Турбина; 5 – Генератор; 6 – Электродвигатель; 7 – Блок силовой электроники генератора; 8 – Блок силовой электроники электродвигателя и пусковое устройство; 9 – Аккумуляторы.

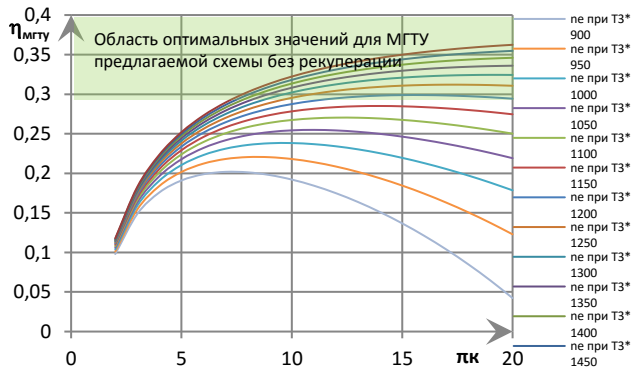


Рисунок 3 График зависимости $\eta_{МГТУ}^*$ от π_k^* в МГТУ предлагаемой тепловой схемы без рекуперации при разных T_3^* .

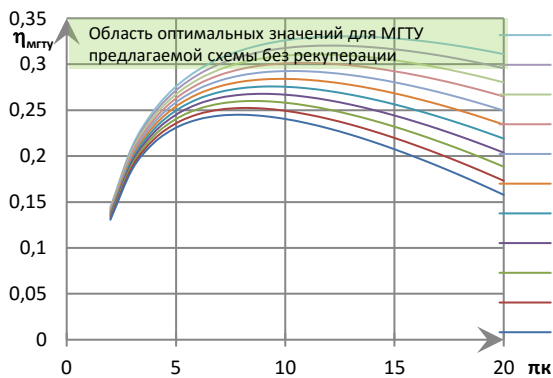


Рисунок 4 График зависимости $\eta_{МГТУ}^*$ от π_k^* в МГТУ предлагаемой тепловой схемы без рекуперации, при разных значениях η_k .

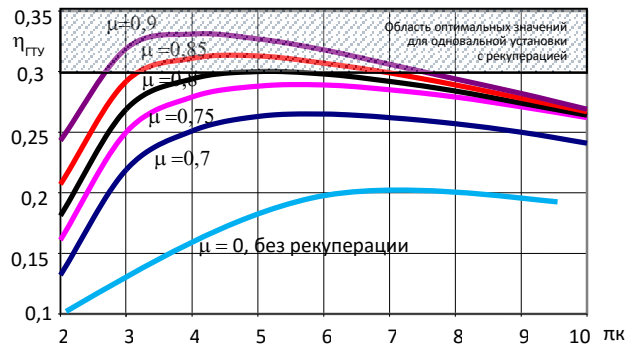


Рисунок 5 График зависимости $\eta_{МГТУ}^*$ от π_k^* в МГТУ предлагаемой тепловой схемы с рекуперацией, при $T_3^* = 1100$ К и разных степенях рекуперации μ .

Расчет предложенной тепловой схемы МГТУ проводился в двух вариантах. Определялся оптимальный π_k^* для различных степеней рекуперации μ . С повышением μ и π_k^* , при $\mu = 0,9$, $\eta_{МГТУ}$ может достигать 33%, при $\pi_k^* = 3,5$ (Рисунок 5). Далее определялся оптимальный π_k^* по максимальному

$\eta_{\text{МГТУ}}$ при $T_3^* = \text{var}$, для МГТУ предлагаемой тепловой схемы без рекуперации (Рисунок 3). В диапазоне π_k^* от 8 до 14 оптимальное значение T_3^* от 1150 К до 1250 К. $\eta_{\text{МГТУ}}$ в МГТУ предлагаемой тепловой схемы без рекуперации изменяется от 19% до 33% при изменении π_k^* от 8 до 14 (Рисунок 4), и изменении η_k от 0,8 до 0,9. Проведенный анализ выбора параметров МГТУ показал, что возможно достичь приемлемых параметров в предложенных тепловых схемах с приводом компрессора от отдельного электродвигателя. Преимуществом предложенной тепловой схемы является возможность выбора оптимального числа оборотов МЦК за счет электронного управления электродвигателем и оптимального числа оборотов МРТ за счет соответствующей подачи топлива. Выбран тип турбины – малорасходная турбина радиально-осевого типа (МРТ). Выбран тип компрессора – малорасходный центробежный компрессор (МЦК).

Глава 3. Выбраны оптимальные параметры и характеристики с их анализом, для малорасходных турбомашин МГТУ. Приведены результаты расчетов МРТ и МЦК. Оценена мощность МРТ и МЦК при разных частотах вращения роторов. Было выполнено расчётное исследование по программе Turbo2. На основании заданных параметров тепловой схемы МГТУ были определены характеристические числа u/C_0 в зависимости от частоты вращения ротора n и среднего диаметра турбины $d_{\text{ср}}$.

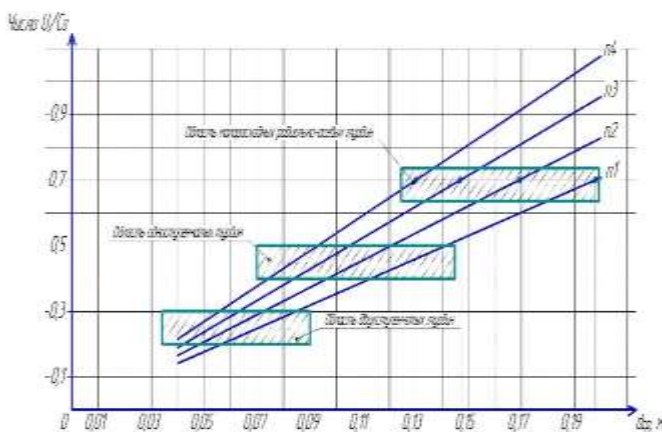


Рисунок 6 График выбора диаметра РК турбины. Зависимость числа u/C_0 от среднего диаметра $d_{\text{ср}}$ и разного числа оборотов: $n_1 = 60\ 000$ об/мин, $n_2 = 70\ 000$ об/мин, $n_3 = 80\ 000$ об/мин, $n_4 = 90\ 000$ об/мин.

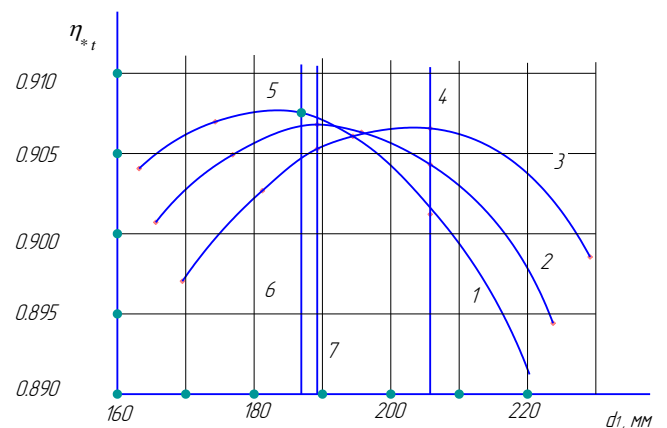


Рисунок 7 Зависимость η_T^* от d_1 РК при различных значениях угла α_1 . 1 – η_T^* при $\alpha_1 = 14^\circ$; 2 – η_T^* при $\alpha_1 = 20^\circ$; 3 – η_T^* при $\alpha_1 = 26^\circ$; 4 – ограничение α_1 по U ; 5 – оптимальная точка; 6 – ограничение d_1 по b_1 (нижняя граница); 7 – ограничение d_1 по b_2 (верхняя граница).

Далее расчеты МРТ и МЦК проводились по модифицированной методике ЛПИ, в программе Turbo2 и численным методом в программе ANSYS. Были рассчитаны семейства характеристик η_k и η_T в диапазоне от 36 000 до 90 000 об/мин., в зависимости от G_B .

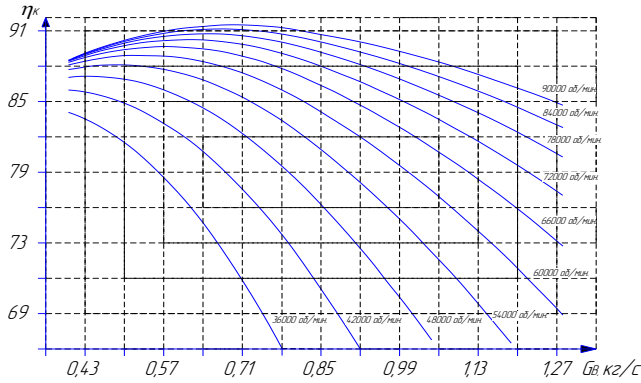


Рисунок 8 График зависимости η_k от G_B при n_k от 36 000 до 90 000 об/мин.

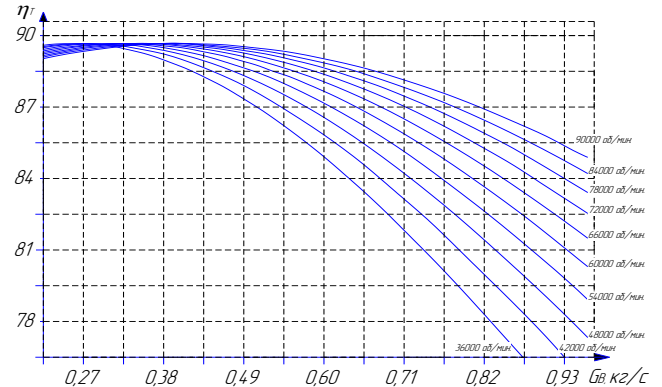


Рисунок 9 График зависимости η_T от G_B при n_T от 36 000 до 90 000 об/мин.

Было проведено исследование характеристик турбины на переменных режимах работы. Был выбран диапазон частоты вращения ротора турбины от 30000 об/мин. до 63000 об/мин., исходя из опт u/C_0 , T_3^* и прочностных характеристик рабочего колеса (Рисунок 10). Аналогично было проведено исследование характеристик компрессора на переменных режимах работы. Был выбран диапазон частоты вращения ротора компрессора от 30000 об/мин. до 63000 об/мин., исходя из расхода воздуха G_B , границ помпажа и прочностных характеристик рабочего колеса (Рисунок 11). В результате характеристики турбины и компрессора были совмещены для определения оптимальных режимных параметров работы установки на частичных режимах (Рисунки 12-17).

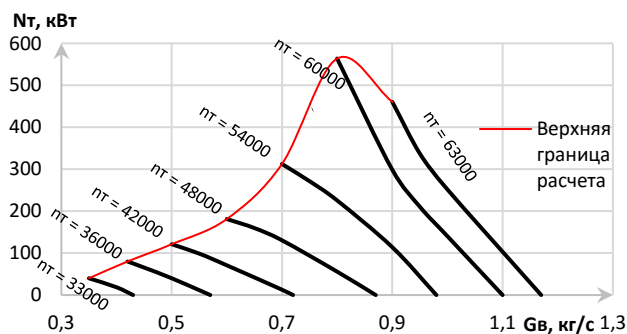


Рисунок 10 Зависимость мощности турбины N_T от расхода воздуха G_B

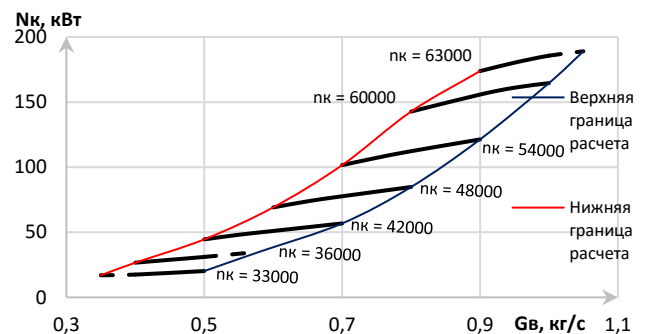
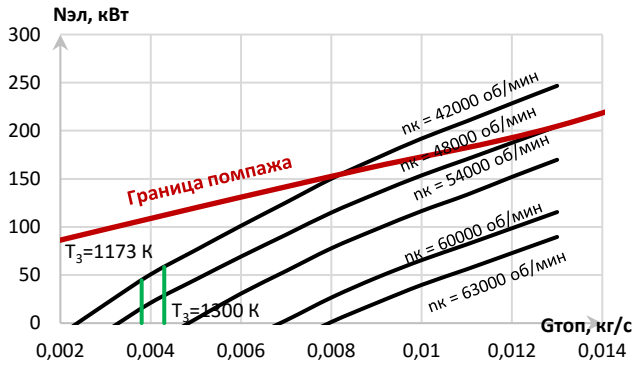
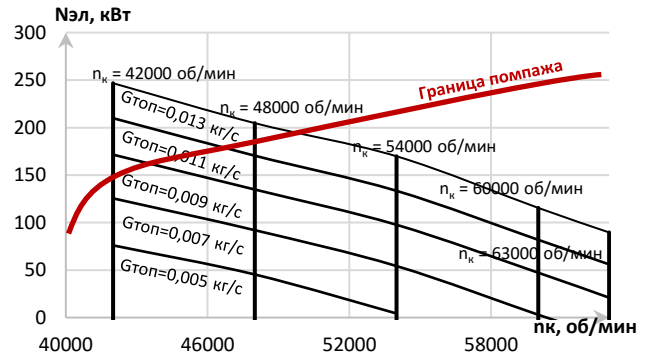
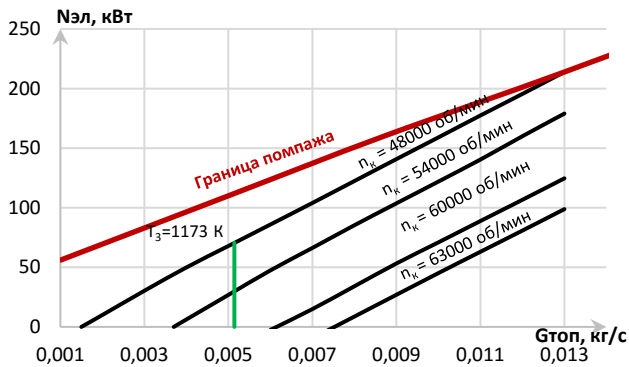
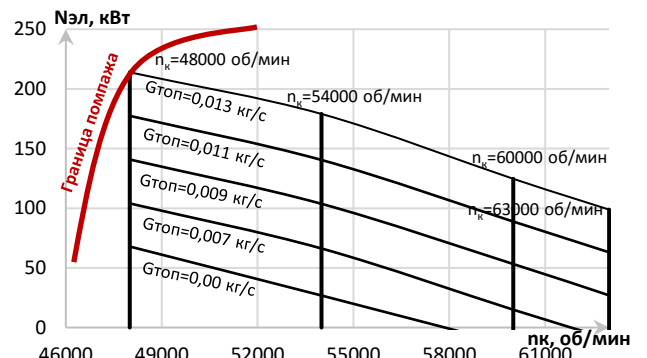
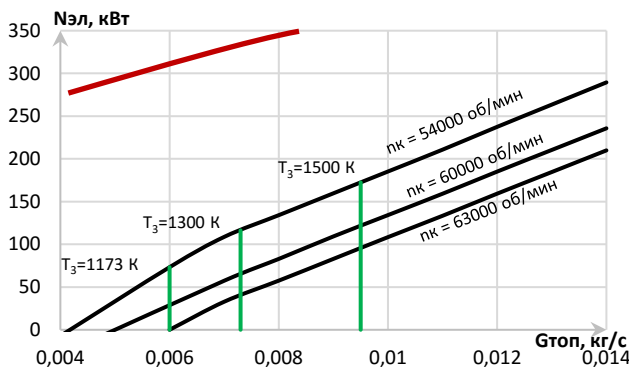
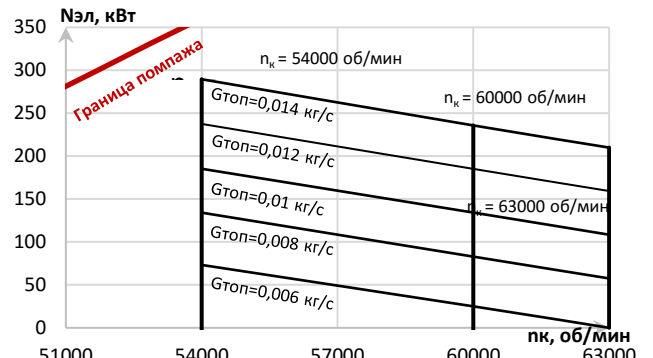


Рисунок 11 Зависимость мощности компрессора N_K от расхода воздуха G_B

Рисунок 12 График режимов, $n_T=42000$ об/минРисунок 15 График режимов, $n_T=42000$ об/минРисунок 13 График режимов, $n_T=48000$ об/минРисунок 16 График режимов, $n_T=48000$ об/минРисунок 14 График режимов, $n_T=54000$ об/минРисунок 17 График режимов, $n_T=54000$ об/мин

Проведенное исследование позволило выявить допустимые режимные характеристики предлагаемой тепловой схемы с независимыми частотами вращения турбины и компрессора. Предполагается, что для рассчитанных вариантов, при условии $n_T = \text{const}$, а $n_k = \text{var.}$, управление осуществляется двумя способами, первый – частотное регулирование ротором компрессора, второй – изменение T_3 за счет изменения подачи топлива в камеру сгорания. Такое управление становится осуществимым из-за отсутствия механической связи между ротором турбины и ротором компрессора.

Глава 4. Для проведения исследования малорасходных радиально-осевых турбин и малорасходных центробежных компрессоров в лаборатории кафедры «ТГиАД» СПбПУ была создана экспериментальная установка ЭУ-700 и экспериментальный стенд для исследования малорасходных турбомашин (Рис. 18-20).



Рисунок 18 Фотография экспериментальной установки для исследования проточных частей МРТ и МЦК.



Рисунок 19 Фотография экспериментальной установки для исследования проточных частей МРТ и МЦК (вид слева)

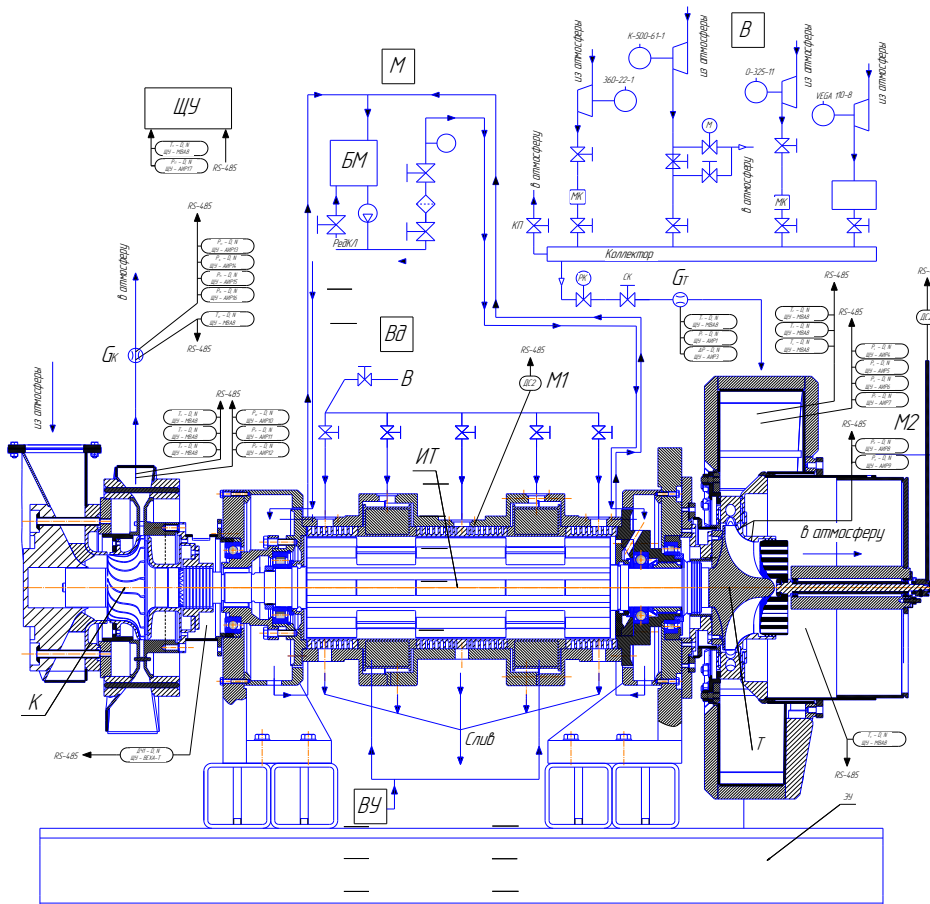


Рисунок 20 Схема стенда и экспериментальной установки для исследования проточных частей малорасходных МРТ и МЦК

Испытания турбины. Выполнено моделирование малорасходных проточных частей турбины. Кинематическое и динамическое подобие для МРТ

Обозначение	Наименование
Элементы	
ЭУ	Экспериментальная установка
М1	Моментомер
М2	Моментомер
Т	Турбина
ИТ	Индукторный тормоз
К	Компрессор
ЩУ	Щит управления
БМ	Бак масляный
В	Водопровод
Системы	
Г _т	Измерение расхода турбины
Г _к	Измерение расхода компрессора
М	Масляная система
В	Воздушная система
В _в	Водяная система
Защита	
СК	Статорный клапан
КП	Клапан предохранительный
Регулирование	
ВУ	Выпрямительное устройство
РК	Регулирующий клапан
РедЖ/1	Редукционный клапан
По назначению	
Д	Сигнал на преобразователь в ПК
Н	Запись измеряемых параметров в ПК
Датчики	
ДС1	Датчик усилия
ДС2	Датчик усилия
ДЧТ	Датчик частоты вращения ротора
Т	Температура
Р	Давление
ДР	Перепад давлений

отличается из-за отличия параметров рабочего тела. Испытание проводится с использованием воздуха в качестве рабочего тела, т.к. камера сгорания отсутствует. Принято моделирование с соблюдением $kM = 1,022 = \text{const.}$ (Табл. 1)

Таблица 1 Параметры МРТ в натуральных и модельных условиях

№п/п	Наименование параметра	Размерность	Натурные условия	Модельные условия			Прим.
				1	2	3	
1	Число Маха на скорости выхода из НА, $M_{сгТ}$	-	1,022	1,022	1,022	1,022	Совпадает
2	Давление перед турбиной P_3^*	Па	345000	337300	339800	351588	
3	Температура перед турбиной T_3^*	К	1223	343	343	343	
4	Рабочее тело	-	Воздух в смеси с продуктами сгорания топлива ($\alpha=7,9$)	Воздух	Воздух	Воздух	
5	Расход рабочего тела, $G_{пр}$	Кг/с	0,816	1,602	1,648	1,711	
6	Характеристическое число u/C_0	-	0,714	0,714	0,714	0,714	Совпадает
7	Частота вращения ротора, n_1	Об/мин	60 000	30 000	33000	36000	
8	Мощность турбины, N_T	кВт	298	143	145	153	
9	Число Рейнольдса, $Re_{сгТ}$	-	$2,2 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^5$	
10	Внутренний η_T	-	0,904	0,806	0,81	0,821	

При испытаниях МРТ рабочее колесо компрессора было заменено втулкой.

Произведено 3 пуска и останова. Выполнено 9 площадок для замеров. Выполнено 270 замеров. В результате обработки массивов данных построены графики (Рис. 21,22).

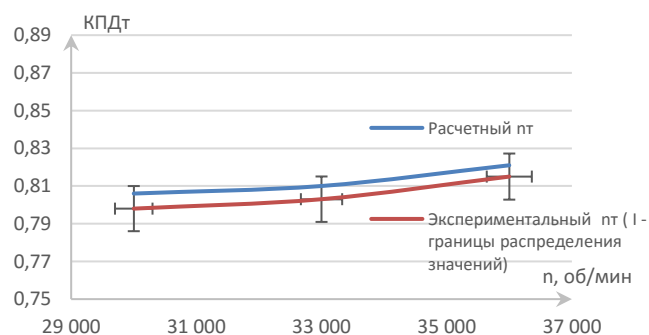
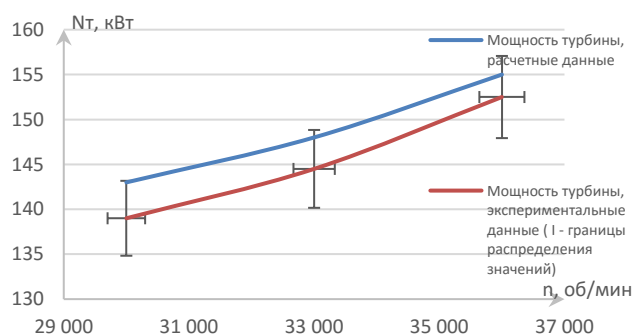


Рисунок 21 График сравнения N_T по расчетным и экспериментальным данным. Рисунок 22 График сравнения η_T по расчетным и экспериментальным данным.

Модифицированные методики газодинамических расчетов малорасходной турбины радиально-осевого типа и моделирование по принятым параметрам подтверждаются экспериментом.

Испытания компрессора. Рабочее тело модельного компрессора - воздух, забираемый при температуре и давлении окружающей среды. Кинематическое и динамическое подобия модели и природы соблюдено полностью. В качестве привода использована турбина $N_T = 143$ кВт. (Таблица 2)

Таблица 2 Параметры МЦК в натуральных и модельных условиях

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Натурные условия	Модельные условия			Прим.
				1	2	3	
1	Давление перед МЦК, P_n	Па	101325	101325	101325	101325	Совпадает
2	Температура перед МЦК, T_n	К	293.15	293.15	293.15	293.15	Совпадает
3	Рабочее тело	-	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Совпадает
4	Расход рабочего тела, G_k	Кг/с	0,815	0,4	0,45	0,55	
5	Частота вращения ротора, n	Об/мин	60 000	30000	33000	36000	
6	КПД политропный, $\eta_{кпол}$	-	0,782	0,8143	0,8162	0,8251	
7	Мощность МЦК, N_k	кВт	142,8	14,2	29,6	50,7	
8	Степень сжатия π_k	-	3,75	1,51	1,79	2,16	

При испытаниях МЦК рабочее колесо компрессора установлено на место. При исследовании проточной части МЦК произведено 3 пуска и останова. Выполнено 6 площадок для замеров. Выполнено 750 замеров. В результате обработки массивов данных построены графики (Рисунки 23,24)

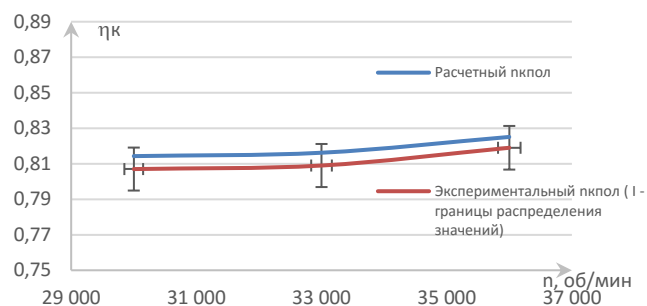
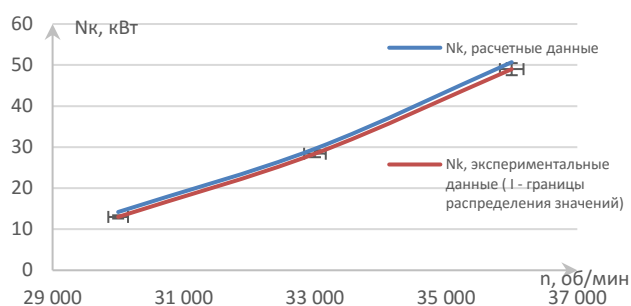


Рисунок 23 График сравнения N_k по расчетным и экспериментальным данным. Рисунок 24 График сравнения $\eta_{кпол}$ по расчетным и экспериментальным данным

Модифицированные методики газодинамического расчёта малорасходного центробежного компрессора и моделирование по принятым параметрам подтверждаются экспериментом.

Таблица 3 Результаты расчета абсолютной и относительной неопределенности

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Абсолютная неопределенность	Относительная неопределенность
1	N_T / N_k	кВт	0.09	0,3
2	G_T / G_k	кг/с	0.009	1.7
3	h_{0T}^* / h_{0k}^*	кДж/кг	0.35	0,23
4	η_T / η_k	%	-	1.63

Для увеличения точности величин, дающих наибольшую неопределенность, применялось многократное повторение замеров значений определяющих параметров, во всем диапазоне изменения π_t , π_k , u/C_0 , N_T и N_k . (Таблица 3)

Глава 5. Для проектирования МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя рекомендуется использовать модифицированные методики

кафедры «ТГиАД» СПбПУ и программные комплексы, использованные в данной работе (Turbo2, ANSYS, CF-Turbo).

Конструктивный облик малогабаритной газотурбинной установки с приводом компрессора от отдельного электродвигателя. Предложено два варианта исполнения турбогенератора: а) по простой схеме без рекуперативного воздухоподогревателя (РВ) (Рисунок 25), б) с противоточным РВ (Рисунок 26).

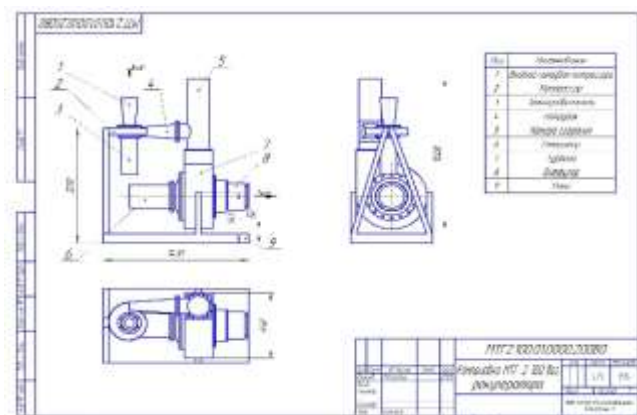


Рисунок 25 Чертеж предлагаемой компоновки без РВ.

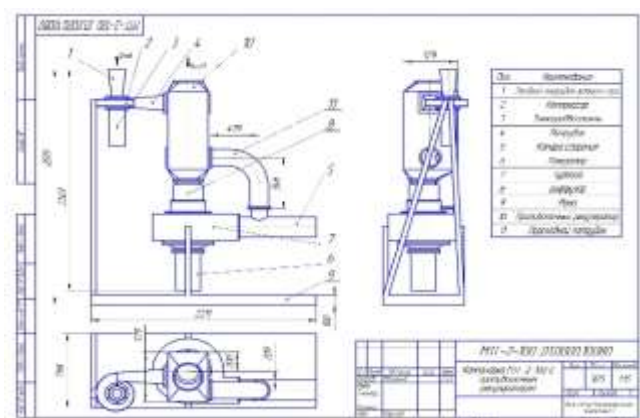


Рисунок 26 Чертеж предлагаемой компоновки с противоточным РВ.

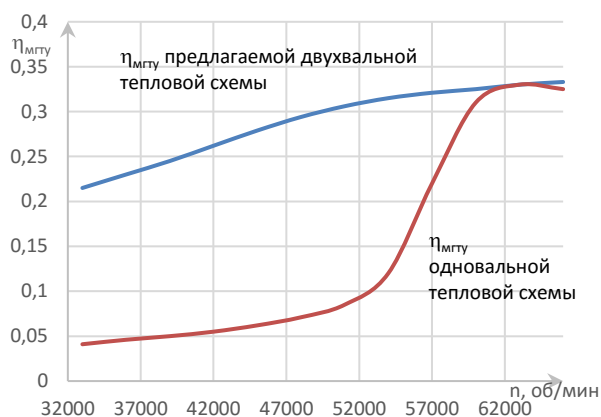


Рисунок 27 График сравнения $\eta_{\text{МГТУ}}$ одновальной тепловой схемы и предлагаемой двухвальной тепловой схемы на частичных режимах

Преимущества предложенных тепловых схем компоновок:

- отсутствие зон «помпажа»;
- повышенный $\eta_{\text{МГТУ}}$ на частичных режимах (Рисунок 27);
- снижение габаритов компрессора;
- снижение габаритов турбины;
- оптимальная компоновка МГТУ.

Заключение. В результате выполненной диссертационной работы разработаны и обоснованы принципы и основные научно технические решения, с применением комплекса современных теоретических методов трехмерного численного моделирования проточных частей малорасходного центробежного компрессора и малорасходной турбины радиально-осевого типа, построения

многорежимной МГТУ предложенной тепловой схемой с приводом компрессора от отдельного электродвигателя:

- проведен обзор и анализ современного состояния теоретических и экспериментальных разработок по созданию МГТУ, сформулированы основные требования к современным МГТУ;
- выполнен анализ и расчет тепловых схем малогабаритных газотурбинных установок. Выбраны основные параметры установки $T_3^* = 1250$ К, $N_e = 100$ кВт, $\pi_k^* = 3,5$ (при $\mu = 0,9$) и $\pi_k^* = 12$ (без рекуператора);
- модифицирована методика расчета МРТ для МГТУ подобного класса, сделан расчет ($\pi_k = \text{var}$). Проведено исследование характеристик турбины на переменных режимах работы. Выбран диапазон частоты вращения ротора турбины от 30000 об/мин. до 63000 об/мин;
- модифицирована методика приближенного расчета МЦК для МГТУ подобного класса, сделан расчет ($\pi_k = \text{var}$). Проведено исследование характеристик компрессора на переменных режимах работы. Выбран диапазон частоты вращения ротора компрессора от 30000 об/мин. до 63000 об/мин.;
- рассчитаны и предложены 4 варианта возможных режимных характеристик, при условии $n_T = \text{const}$, а $n_k = \text{var}$. Предполагается, что управление осуществляется двумя способами, первый – частотное регулирование ротором компрессора, второй – изменение T_3 за счет изменения подачи топлива в камеру сгорания;
- создана экспериментальная установка ЭУ-700 и экспериментальный стенд. Для исследования МРТ сделано моделирование с соблюдением $M_{c1T} = 1,022 = \text{const}$. Проведены испытания, модифицированные методики газодинамических расчетов МРТ и моделирование по принятым параметрам подтверждаются экспериментом;
- для исследования МЦК использована приводная турбина $N_T = 143$ кВт, модифицированные методики газодинамического расчёта МЦК и моделирование по принятым параметрам подтверждаются экспериментом;
- разработаны рекомендации по проектированию малорасходных турбин и компрессоров. Разработаны рекомендации по созданию конструктивного облика малогабаритной газотурбинной установки.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 4 в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Барсков, В.В. Выбор оптимальных решений при проектировании малогабаритных газотурбинных установок малой мощности // Барсков В.В // Научно-технические ведомости. Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та — 2013. № 4-1 (183) — с. 244-249.
2. Барсков, В.В. Устройство для крепления сегментного балансирующего груза на дисках газотурбинных установок малой мощности // Барсков В.В. авторское свидетельство РФ на полезную модель №132195 (2013 г.)
3. Барсков, В.В. К вопросу о создании высокоэффективных микротурбин с независимыми частотами вращения компрессора и турбины // Барсков В.В., Рассохин В.А., Беседин С.Н., А.В. Осипов // Изд-во Вестник Брянского Государственного технического университета. №3(47) — 2015. с. 6-14
4. Барсков, В.В. Разработка методики испытаний малорасходных проточных частей турбины и компрессора // Барсков В.В., Рассохин В.А., Беседин С.Н., Тулубенский. // Изд-во Вестник Брянского Государственного технического университета. №1(49) — 2016. с. 9-15

Публикации в журналах и сборниках, индексируемых в РИНЦ:

5. Барсков, В.В. Устройство для крепления сегментного балансирующего груза на дисках ГТУ малой мощности// Барсков В.В. Доклад «Неделя науки 2013» СПбПУ Материалы научно-практической конференции с международным участием Институт энергетики и транспортных систем СПб ГПУ. Ч.2. - СПб. Изд-во Политех. ун-та. - 2014 - С.57-59.
6. Барсков, В.В. Анализ использования мини-ТЭЦ на отходах от лесозаготовки и лесопереработки // Барсков В.В. Забелин Б.Ф. // ПИМаш (ЛМЗ-ВТУЗ) Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции СПб, Изд-во Политех. ун-та с. 1-3
7. Барсков, В.В. К вопросу оценки эффективности внедрения автономных энергетических установок малой мощности на базе микротурбин // Барсков В.В., Забелин Б.Ф. // Наука и образование в жизни современного общества: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 апреля 2015г. В14 томах. Том 6. Тамбов ООО «Консалтинговая компания Юком» 2015. С.164
8. Барсков, В.В. К вопросу повышения конкурентоспособности и технологичности малорасходных газотурбогенераторов на этапе проектирования // Барсков В.В. Забелин Б.Ф. // «Научный альманах» 2015 №5(7) — с. 116-122
9. Барсков, В.В. К вопросу о повышении эффективности использования малоразмерных газотурбинных генераторов в оборонной технике» // Барсков В.В. Зубачев А.Б. // Санкт-Петербург Научно-технический журнал. Вопросы оборонной техники. 2015