

На правах рукописи

Беседин Сергей Николаевич

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ  
РЕАЛИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ МИКРОТУРБИННОГО ГЕНЕРАТОРА  
МОЩНОСТЬЮ 100 КВТ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ  
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор

Рассохин Виктор Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Лебедев Александр Серафимович

кандидат технических наук

Счисляев Сергей Михайлович

Ведущая организация:

ОАО «Научно-производственное объединение Центральный котло-турбинный институт им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

Защита состоится «17» мая 2011 г. в «16» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 235.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2011г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.229.06, к.т.н., доцент



Талалов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

Области использования микротурбинных генераторов (МТГ) очень широки: это объекты промышленного, социального, сельскохозяйственного и жилищного назначения, удаленные от сетевой инфраструктуры или подключение которых невозможно по разным причинам, а также в качестве резервного источника энергоснабжения.

Преимущества микротурбинных генераторов: высокая надежность, длительный ресурс до капитального ремонта, работа без смазок и моторного масла, возможность работы на различных видах топлива, высокое качество вырабатываемой электроэнергии, низкий уровень выбросов, вибраций, шума, возможность работы в течение длительного времени при низких нагрузках, низкая стоимость эксплуатационных расходов.

В связи с актуальностью поставленных задач по развитию автономной энергетики и высокой востребованностью их на рынке локальных источников электрической и тепловой энергии, были выполнены исследования по научно-техническому обоснованию и практической реализации принципов создания микротурбинных генераторов мощностью 100 кВт. Всё вышесказанное определяет высокую актуальность диссертационной работы.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является научно-техническое обоснование и практическая реализация принципов создания микротурбинного генератора мощностью 100 кВт с характеристиками, близкими к характеристикам лучших зарубежных аналогов. К ним относится высокий КПД преобразования энергии топлива в электрическую энергию с КПД, превышающим 30%, максимальная защищенность окружающей среды – выбросы  $\text{NO}_x$  менее 15 ppm (для микротурбин, использующих природный газ) и другие.

Для достижения поставленной цели необходимо было использовать комплекс новых технических решений, не применявшийся ранее в отечественной энергетике.

Новые технические решения позволили выполнить вышеуказанные требования к МТГ и обеспечат их широкое внедрение. К таким решениям относится применение малорасходных высокоэффективных радиально-осевых турбин и центробежных компрессоров, газодинамических подшипников, теплообменников с высокой степенью регенерации, высокооборотных электрогенераторов, низкотоксичных камер сгорания.

### **Задачи исследования:**

- разработать методологическое обеспечение для исследования тепловых схем микротурбинных генераторов;
- выполнить параметрическую оптимизацию, на основании которой произвести выбор оптимальных параметров и характеристик МТГ;

- разработать принципы построения конструктивной схемы перспективного микротурбинного генератора. Выбрать основные элементы МТГ, обосновать их характеристики;
- создать исследовательскую базу и технологическое оборудование; разработать методики проведения эксперимента и обработки экспериментальной данных;
- провести эксперименты по определению основных характеристик турбины, компрессора, камеры сгорания, газодинамических подшипников и высокооборотного электрогенератора;
- разработать конструктивный облик микротурбинного генератора МТГ-100.

Решению поставленных задач и обобщению полученных результатов посвящены соответствующие главы данной работы.

**Научная новизна работы** заключается в том что:

- путем применения комплекса современных теоретических и экспериментальных методов разработаны и обоснованы основные технические решения для создания отечественного микротурбинного генератора. К таким решениям относятся применение малорасходных высокоэффективных радиально-осевых турбин с внутренним КПД по полным параметрам не менее 90% и начальной температурой газа перед турбиной, равной 1173К; малорасходных центробежных компрессоров с политропическим КПД = 0.82 и степенью повышения давления не менее 3.8; газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с преобразователями с частотой вращения ротора до 60000 об/мин; низкотоксичных камер сгорания с низким уровнем эмиссий  $\text{NO}_x < 15 \text{ ppm}$ ; теплообменников с высокой степенью регенерации (0.9);
- обоснованы на основе параметрической оптимизации оптимальные характеристики, как основных узлов (см. выше), так и микротурбинного генератора в целом, которые в условиях конструкторских, технологических и производственных ограничений обеспечивают максимальные показатели КПД и мощности (внутренний КПД не менее 34% и внутренняя мощность 100 кВт);
- в результате модельных исследований компрессора и турбины, спроектированных для МТГ малой мощности, определены их характеристики в зависимости от частоты вращения, идентифицирована расчётная численная модель, уточнена постановка задачи и методика расчёта;
- экспериментально выявлены основные закономерности процессов горения в диффузионном режиме и режиме предварительного смешения бедных гомогенных смесей в выносной камере сгорания МТГ на газообразном топливе;
- полученные разгонные характеристики газодинамических подшипников микротурбинных генераторов показали устойчивость их работы во всем диапазоне разгона и на номинальных частотах вращения.

**Практическая значимость работы** заключается в том что:

1. Обоснованы, исследованы и реализованы в конкретных конструкциях: радиально-осевой компрессор с КПД 82,0% и надёжным запасом от помпажных режимов, радиально-осевая турбина с температурой газа на входе 1173К, низкоэмиссионная камера сгорания с низким уровнем эмиссий  $\text{NO}_x < 15 \text{ ppm}$ , обеспечивающая заданное поле распределения температур перед турбиной. Эти элементы могут послужить базовыми решениями при практической реализации МТГ.

2. Разработана, создана и оснащена измерительными системами материально-техническая база для исследования модельных и натуральных узлов, таких как радиально-осевая турбина, центробежный компрессор, выносная камера сгорания, газодинамические подшипники и высокооборотный электрогенератор.

3. Результаты исследований внедрены при разработке проекта и создании экспериментального образца микротурбинного генератора мощностью 100кВт. Накоплен уникальный опыт технологического освоения производства газотурбинного оборудования в условиях использования современного машиностроительного комплекса по таким технологическим операциям как изготовление центробежных компрессоров и радиально-осевых турбин, хвостовых соединений и др.

**Личный вклад** автора заключается в следующем:

- участие в научно-техническом обосновании выбора оптимальных параметров и конструктивных решений при проектировании основных узлов МТГ;

- участие в разработке численных моделей, выборе и тестировании методик расчёта газодинамики, теплового и напряжённо-деформированного состояния основных узлов МТГ, анализе результатов;

- участие в разработке оборудования стендов для исследования модельных и натуральных узлов радиально-осевых турбин, центробежных компрессоров, выносных камер сгорания, газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов, их наладке, разработке и тестировании системы измерений, проведении экспериментов и обработке полученных результатов;

- участие в разработке конструкции микротурбинного генератора мощностью 100 кВт нового поколения, как результат реализации комплекса методов проектирования в технологически ориентированном направлении впервые в отечественной практике.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечена:

- проведением экспериментальных исследований по апробированным и научно обоснованным методикам на стендовом оборудовании, прошедшем метрологическую аттестацию, с применением современных измерительных приборов и аппаратуры с минимальными погрешностями измерений, обработкой опытных данных с использованием устойчивых методов статистического анализа и совпадением результатов тестовых опытов с наиболее надёжными результатами других исследований;

- использованием в процессе выполнения работы в качестве базовых наиболее современных апробированных и тестированных методик на основе численного анализа в лопаточных аппаратах турбомашин, решением сопряжённых задач теплообмена и прочности в осесимметричной и трехмерной постановке.

**На защиту выносятся:**

- результаты научного обоснования разработки и практической реализации создания современного микротурбинного генератора;
- результаты теоретической разработки и исследований характеристик радиально-осевой турбины, центробежного компрессора, выносной камеры сгорания, теплообменника и газодинамических подшипников;
- результаты комплексного подхода к созданию перспективного отечественного микротурбинного генератора, связанные с использованием прототипов и поиском оптимальных термодинамических, газодинамических и конструктивных решений в условиях технологических ограничений имеющегося производственного оборудования.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях:

- Совместное заседание Научных советов РАН «Теплофизика и теплоэнергетика» и «Комплексные проблемы энергетики» 18 февраля 2010г. Москва. Повестка дня: «Развитие малой энергетики в Российской Федерации. Состояние и перспективы».
- Международная научно-практическая конференция «XXXVIII неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 30.11-05.12 2009 г., Два доклада.
- XVII Международная научно-методическая конференция. «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 11-12 февраля 2010 г.
- II Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения», г. Самара, 6-8 апреля 2010 г.
- Международная конференция «Инновационная политика и изобретатели (Россия–начало XXI века)», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 28.04.2009г..
- Научно-технический семинар на тему «Научно-техническое обоснование и практическая реализация создания микротурбинного генератора мощностью 100 кВт на основе современных расчётно-экспериментальных методов», СПбГПУ, Санкт-Петербург, СПбГПУ, 21.02.2001г.

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 10 печатных научных трудах.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, приложений и списка литературы. Она изложена на 142 страницах текста и содержит 134 рисунка, 44 таблицы и списка литературы из 64 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрены области применения микротурбинных генераторов (в зарубежной литературе такие установки называют микротурбины). Сформулированы основные требования к микротурбинным генераторам, показаны их преимущества и эффективность использования, обоснована актуальность темы диссертации.

**В первой главе** приведен обзор и состояние развития современных зарубежных микротурбинных генераторов, производимых зарубежными компаниями: Ingersoll, Turbec, Capstone, Elliott, Bowmen, Nissan и Toyota. Представлены их основные характеристики. Выполнен сравнительный анализ их показателей. Проанализированы их преимущества и недостатки. Рассмотрены области применения и конструктивное исполнение. Сформулированы цели и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию и выбору параметров и характеристик микротурбинного генератора. Разработано методическое обеспечение для исследования тепловых схем энергетических газотурбинных установок малой мощности. Выполнена параметрическая оптимизация, на основании которой произведен выбор оптимальных параметров и характеристик микротурбинного генератора.

Были рассмотрены две тепловые схемы микротурбинных генераторов: простая (рис.1) и с регенерацией тепла уходящих газов.

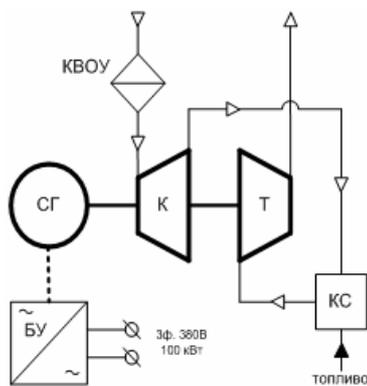


Рис.1. Тепловая схема МТГ простой схемы

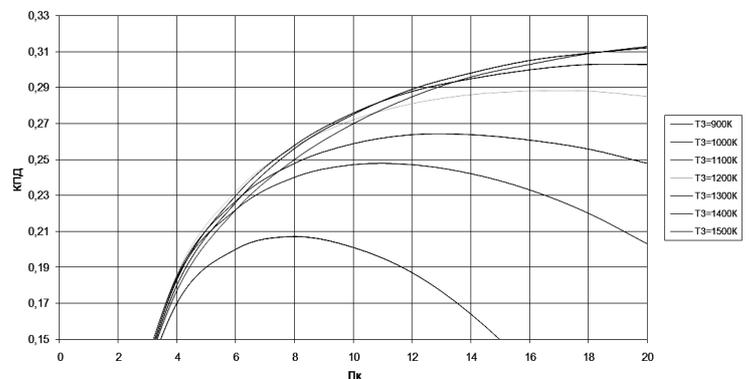


Рис.2. Зависимость КПД от степени повышения давления и разной начальной температуры газа

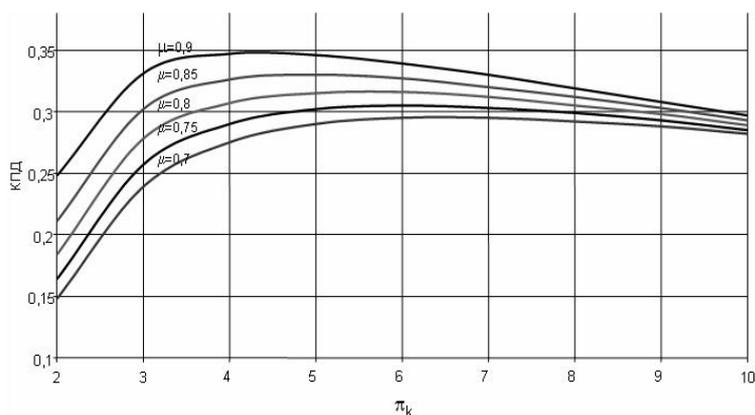
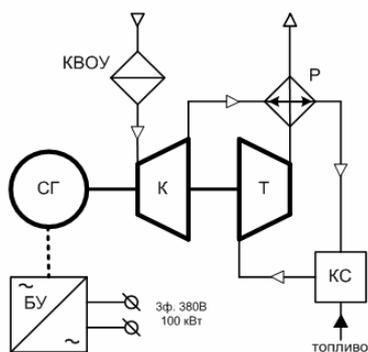


Рис.3. Тепловая схема МТГ с регенерацией

Рис.4. Зависимость КПД от степени повышения давления и разной степени регенерации

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение
Температура окружающей среды, К	$T_n$	288
Давление окружающей среды, МПа	$P_n$	0,1013
Коэффициент потерь полного давления во входном устройстве	$\sigma_{ВХ.УС}^*$	0,96
Внутренний КПД компрессора по полным параметрам	$\eta_{KB}^*$	0,82
Начальная температура газа перед турбиной, К	$T_3^*$	1173
Степень повышения давления в компрессоре	$\pi_k$	не менее 3,8
Коэффициент полноты сгорания	$\eta_{КС}^*$	0,99
Коэффициент потерь полного давления в КС	$\sigma_{КС}^*$	0,96
Степень регенерации	$\mu$	не менее 0,9
Коэффициент потерь полного давления по воздушной стороне теплообменника	$\sigma_{ВТ}^*$	0,97
Коэффициент потерь полного давления по газовой стороне теплообменника	$\sigma_{ГТ}^*$	0,95
Внутренний КПД турбины по полным параметрам	$\eta_{ТВ}^*$	0,9
Коэффициент потерь полного давления в выходном устройстве	$\sigma_{ВЫХ.УС}^*$	0,96
Расход воздуха через компрессор, кг/с	$G_B$	0,882
Внутренний КПД МТГ	$\eta_{ГТУ}^*$	0,35

Выполненная параметрическая оптимизация показала, что микротурбинные генераторы простой схемы для обеспечения КПД свыше 30% требуют применения охлаждаемых турбин даже при начальных температурах газа  $T_3^* \approx 1500$  К и компрессоров с высокими степенями повышения давления (рис.3), что практически трудно реализуется в микротурбинных генераторах. На рис.4 показаны характеристики микротурбинного генератора с регенерацией в зависимости от степени повышения давления и степени регенерации. В результате выполненной параметрической оптимизации были выбраны оптимальные характеристики и параметры микротурбинных генераторов с ре-

генерацией, обеспечивающие получение КПД не менее 35%, приведенные в таблице 1. В работе показаны результаты расчётного исследования по влиянию характеристик основных узлов микротурбинных генераторов на внутренний КПД, что позволяет выбрать главные пути совершенствования основных элементов генераторов для получения максимального КПД микротурбинного генератора.

**В третьей главе** разработаны принципы построения конструктивной схемы перспективного микротурбинного генератора малой мощности. Путем применения комплекса современных теоретических методов разработаны и обоснованы основные технические решения для создания отечественного микротурбинного генератора. К таким решениям относится применение малорасходных высокоэффективных турбин, малорасходных центробежных компрессоров, газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с преобразователями, малотоксичных камер сгорания и теплообменников с высокой степенью регенерации. Выбраны, оптимизированы и обоснованы их характеристики. В качестве малорасходной турбины микротурбинного генератора была принята радиально-осевая центробежная турбина, как имеющая максимальную экономичность и другие преимущества при малых мощностях по сравнению с другими турбинами. В работе рассмотрены 3 варианта сопловых аппаратов (СА), исследованы потери кинетической энергии в них. Для практической реализации принята конструкция СА с осесимметричными соплами (рис.5) как наиболее технологичная. Кроме того, такая конструкция может быть изготовлена из керамики, что позволит в дальнейшем увеличить начальную температуру газа перед турбиной и поднять КПД микротурбинного генератора. На рис.7 приведены результаты выбора оптимальных геометрических параметров турбины с учётом ограничений. Спрофилированное и спроектированное рабочее колесо изображено на рис.6.

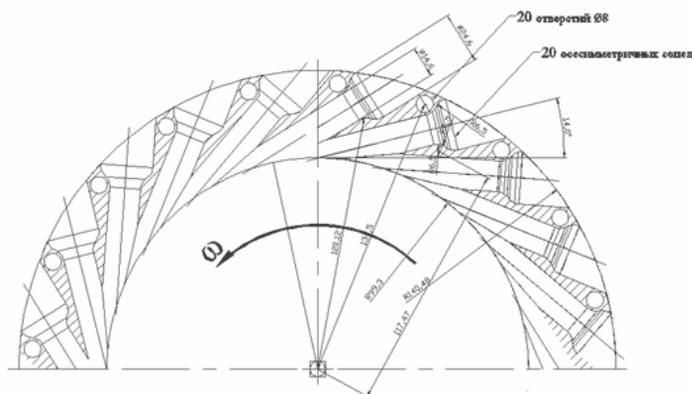


Рис.5. Сопловой аппарат турбины



Рис.6. Рабочее колесо турбины

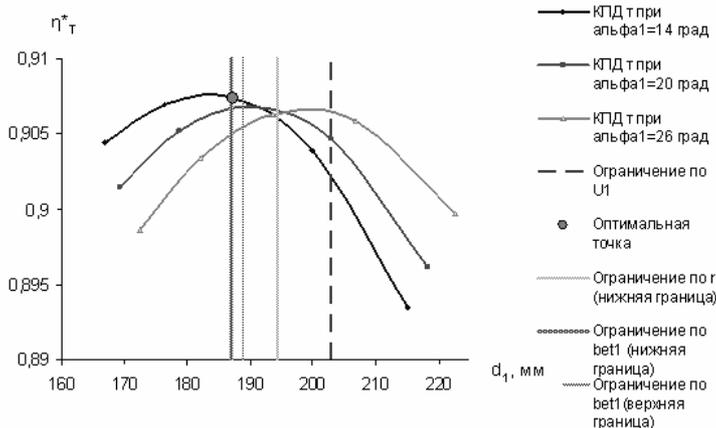


Рис.7. К выбору оптимальных характеристик турбины

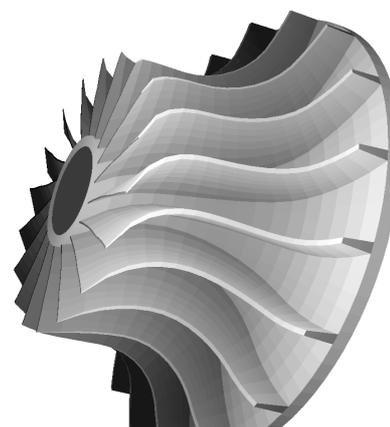


Рис.8. Рабочее колесо компрессора

В работе выполнен выбор параметров малорасходного центробежного компрессора, профилирование входной и выходной улиток, лопаточного и безлопаточного диффузоров, рабочего колеса, расчёт и построение характеристик (рис.8).

Одним из наиболее радикальных решений концепции перспективного МТГ является отказ от опорных элементов с масляной смазкой и охлаждением. Это стало возможно благодаря применению газодинамических подшипников (ГП). Прогресс, достигнутый в разработке и эксплуатации ГП, а также тенденция их дальнейшего развития позволяет рассматривать ГП в качестве перспективы применения в микротурбинных генераторах. Из известных конструкций был выбран лепестковый газодинамический подшипник как наиболее удовлетворяющий поставленной задаче. Это обусловлено простотой конструкции, малыми массогабаритными и стоимостными показателями, большим ресурсом и надёжностью. Принцип действия лепестковой опоры основан на эффекте повышения давления в клиновидном зазоре, возникающем при относительном перемещении поверхностей, разделенных слоем вязкого газа – «эффекте гидродинамического клина». Преимущества ЛГП: высокая рабочая температура, компенсация тепловых деформаций, высокие демпфирующие свойства, самоцентрирование.

Для создания роторов микротурбинных генераторов на газовых опорах в диссертации были разработаны методы расчёта, проектирования и изготовления ГП с увеличенной несущей способностью и улучшенными упругодемпферными свойствами, методы расчёта динамических характеристик роторов МТГ на ГП, высокотемпературные антифрикционные покрытия и созданы осевые и радиальные газодинамические подшипники (рис.9).

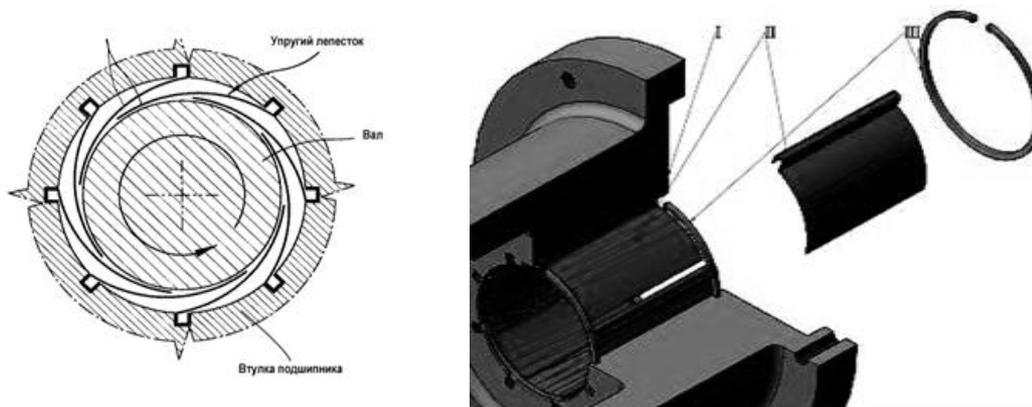


Рис.9. Лепестковый подшипник

В результате выполнения работы выбор наиболее оптимального типа электрогенератора сделан в пользу высокоскоростной синхронной электрической машины с возбуждением постоянными магнитами. Данный тип электрической машины обладает наивысшим КПД, удельной генерируемой мощностью и высокой скоростью вращения ротора. Высокоскоростной синхронный стартер-генератор обеспечивает пуск и выработку электроэнергии от микротурбинного генератора.

На рис.10 показаны результаты теплового и электромагнитного расчетов, выполненные с помощью программы Elcad.

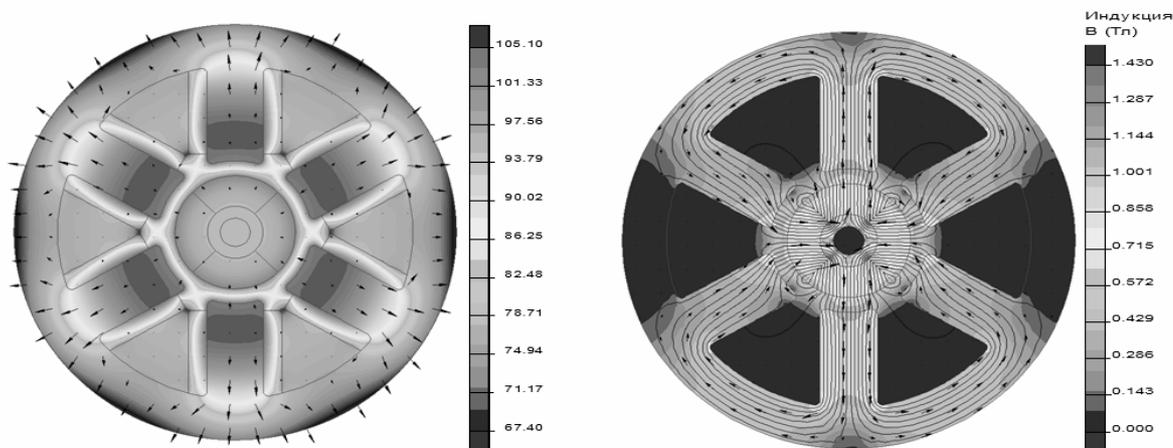


Рис.10. Результаты теплового и электромагнитного расчета стартер-генератора

Одной из важных проблем в создании МТГ является разработка и создание малогабаритной низкотоксичной камеры сгорания. Для этих целей наиболее предпочтительной является индивидуальная выносная камера сгорания.

Преимуществами данной схемы являются: низкий уровень выбросов вследствие минимального объема жаровой трубы до отверстий смесителя, низкий уровень токсичных выбросов вследствие максимального объема жаровой трубы, максимальный эффективный КПД термодинамического цикла вследствие высокого значения коэффициента полноты сгорания.

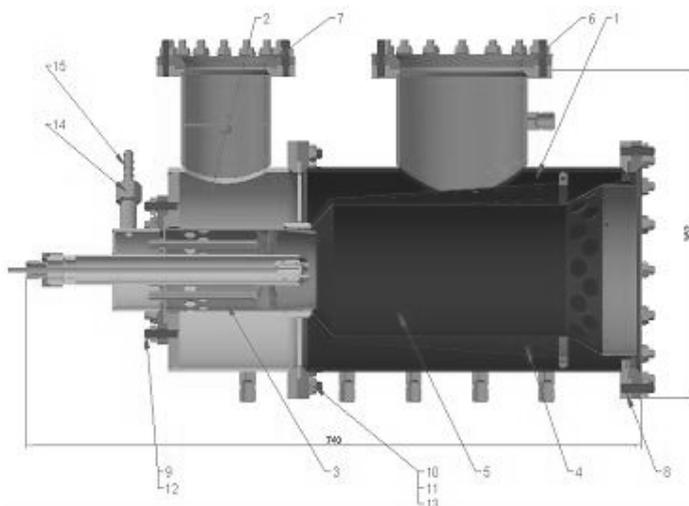


Рис.11. Камера сгорания

Малые габариты установки и повышенные требования к надежности, экономичности и экологическим характеристикам подтверждают целесообразность выбора камеры сгорания выносного типа, с горелкой предварительного смешивания с двумя каналами подвода топлива, регулируемые трактами первичного воздуха и вторым каналом топлива, без системы внутреннего заградительного охлаждения пламенной трубы (рис.11).

При выборе теплообменника системы регенерации МТГ для обеспечения необходимого значения степени регенерации 0.9 были рассмотрены разные компактные поверхности теплообмена. Анализ рассмотренных поверхностей показал, что максимальная компактность и минимальная стоимость достигается в теплообменниках с пластинчатыми поверхностями нагрева. Выбор числа ходов теплообменника осуществлялся с помощью метода Кейса – Лондона. Полученные параметры и характеристики рассмотренных элементов МТГ практически обеспечивают принятые оптимальные параметры тепловой схемы микротурбинного генератора.

**Четвертая глава** посвящена прочностному обоснованию основных элементов перспективного микротурбинного генератора. С помощью численных методов было выполнено расчётное исследование по определению прочностных характеристик основных узлов МТГ: турбины, компрессора, ротора и камеры сгорания. В работе приведены эквивалентные напряжения, коэффициенты запаса прочности и вибрационная диаграмма турбины, эквивалентные напряжения, коэффициенты запаса прочности и вибрационная диаграмма компрессора, прочностные характеристики ротора, результаты прочностных исследований камеры сгорания.

**В пятой главе** диссертации приведены материалы по созданной экспериментальной базе для исследования основных элементов микротурбинных генераторов (турбины, компрессора, камеры сгорания и газодинамических подшипников).

Современный уровень совершенства турбомашин предъявляет высокие требования к качеству аэродинамических исследований их проточных частей. Для проведения опытных исследований разрабатываемого микротурбинного генератора возникла необходимость в создании экспериментального стенда, позволяющего испытывать модельные ступени турбин при модельных режимных параметрах и компрессоров в натуральных условиях. Для решения этой важной задачи изготовлено специальное экспериментальное оборудо-

дование, которое смонтировано в лаборатории кафедры «Турбинные двигатели и установки» СПбГПУ. В состав стенда входят: воздуходушная станция лаборатории; экспериментальная установка ЭУ-120Тц; масляная система и водяная система; системы управления, измерения и сбора экспериментальных данных.

Экспериментальная установка ЭУ-120Тц для исследования радиальных центростремительных турбинных ступеней и центробежных компрессоров состоит из следующих основных узлов: индукторного тормоза, исследуемых объектов и моментомера (рис.12). Объекты исследования представлены на рис.12. Для определения показателей, характеризующих совершенство проточных частей исследуемых объектов и газодинамических характеристик ступеней, разработаны методики обработки экспериментальных данных.

Для проведения испытаний камеры сгорания был создан стенд. Фото камеры сгорания представлено на рис.13. Экспериментальные характеристики показаны на рис.14 ( $\square$  -  $\text{NO}_x$ ;  $\diamond$  -  $\text{CO}$ ).

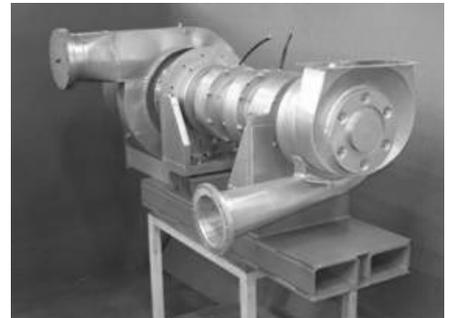
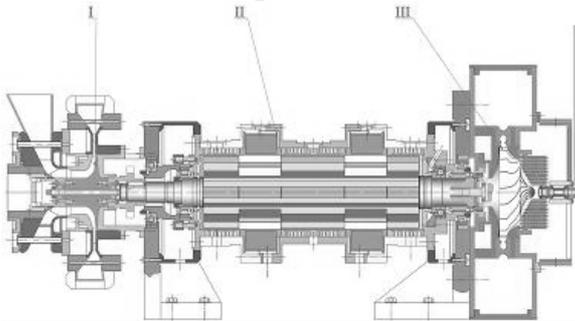


Рис.12. Экспериментальная установка ЭУ-120Тц, общий вид, фото установки



Рис.13. Фото КС

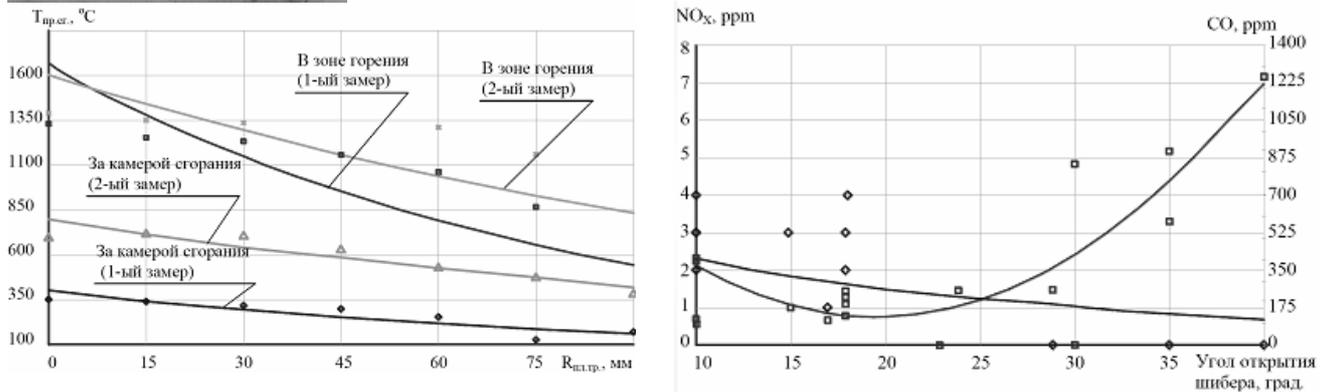


Рис.14. Экспериментальные данные по исследованию КС

Для исследования газодинамических подшипников была создана установка, изображенная на рис.15. Произведено исследование разгонных характеристик (рис.16.), наработка времени работы подшипников и числа пусков-остановов. Исследования показали, что время «всплытия» ротора составляет 0,8 с и скорость 3000 об/мин, что является очень хорошим результатом для ЛГП.



Рис.15. Установка для испытаний газодинамических подшипников

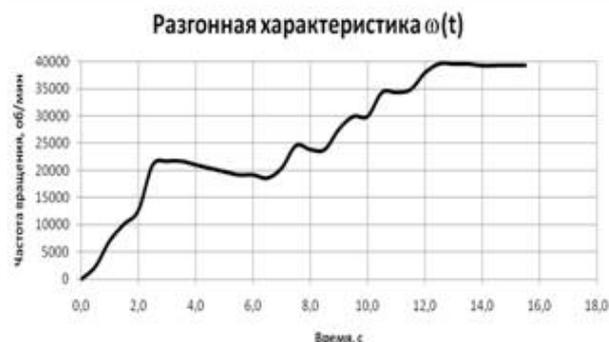


Рис.16. Разгонная характеристика ГП

В рамках данной работы был разработан новый тип антифрикционного высокотемпературного покрытия на основе наноалмазов. Исследования данного антифрикционного покрытия на высокотемпературной машине трения показали, что оно сохраняет работоспособность во всем интервале срока эксплуатации.

**В шестой главе** приведено описание конструкции созданного перспективного МТГ.

Микротурбинный генератор МТГ-100, рис.17 и 18 состоит из электрогенератора I и малогабаритного турбокомпрессора II. Теплообменник системы регенерации и камера сгорания выполнены выносные. По компоновке двигатель трехпорный на газодинамических подшипниках.

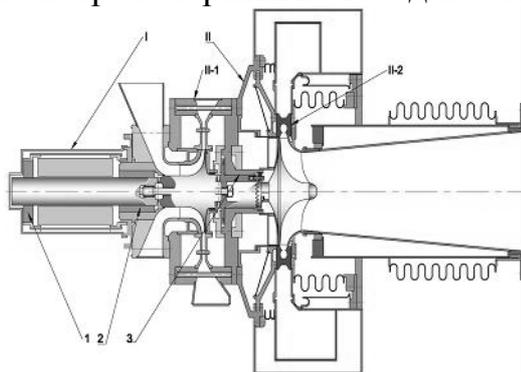


Рис.17. Общий вид МТГ-100

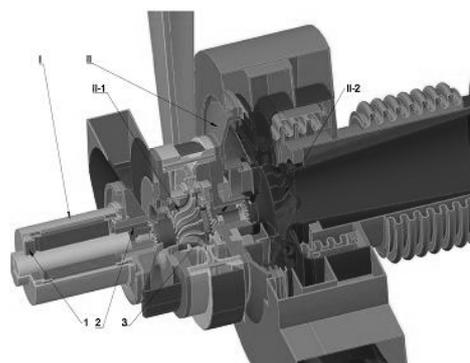


Рис.18. Трехмерное изображение МТГ-100

В качестве опорных и упорных элементов ротора используются газодинамические лепестковые подшипники 1÷3. Генератор I, центробежный компрессор II-1 и радиально-осевая турбина II-2 соосны. Турбокомпрессор II состоит из центробежного компрессора II-1 и радиально-осевой турбины II-2.

Рабочие колеса центробежного компрессора (рис.19) и радиально-осевой турбины (рис.20) соосны, расположены на одном валу.



Рис.19. Фото рабочего колеса компрессора



Рис.20. Фото рабочего колеса турбины



Рис.21. Фото ротора МТГ-100

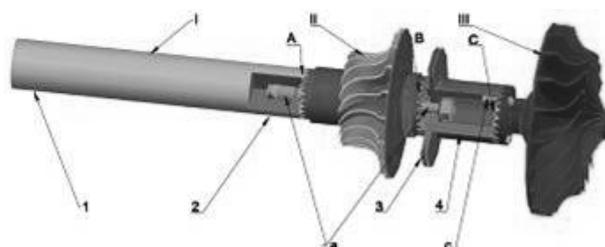


Рис.22. Ротор МТГ-100

Ротор микротурбинного генератора МТГ-100, рис. 21 и 22, состоит из опорных шеек и упорного диска подшипников, роторной части генератора I, рабочего колеса центробежного компрессора II, рабочего колеса радиально-осевой турбины III, и связующих элементов – шпилек а,с с гайками. Крутящий момент турбины передается по валу хиртовыми соединениями.

### Заключение

- разработаны и обоснованы основные технические решения с применением комплекса современных теоретических методов трёхмерного численного моделирования основных узлов микротурбинного генератора с максимальным использованием конструкторско-технологических решений. К таким решениям относятся применение малорасходных высокоэффективных радиально-осевых турбин с внутренним КПД по полным параметрам не менее 90% и начальной температурой газа перед турбиной, равной 1173К; малорасходных центробежных компрессоров с политропическим КПД = 0.82 и степенью повышения давления не менее 3.8; газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с преобразователями с частотой вращения ротора до 60000 об/мин, низкотоксичных камер сгорания с низким уровнем эмиссий  $NO_x < 15$ ;
- показано, что создание микротурбинного генератора на уровень КПД 0,34, при достигнутых на сегодняшний день КПД турбомашин и гидравлических потерь в трактах, по простой схеме МТГ не представляется возможным;
- проведены стендовые модельные испытания основных узлов МТГ, с идентификацией численных моделей с экспериментальными результатами и оптимизацией технических решений по результатам испытаний;
- оптимизированы термодинамические параметры основных узлов микротурбинного генератора малой мощности – компрессора, камеры сгорания и турбины, а их характеристики взаимоувязаны для работы в едином турбоагрегате;

- оптимизирован, спроектирован и создан центробежный компрессор со степенью сжатия и политропический КПД на номинальном режиме 3.8 и 82% соответственно. Тестовые испытания практически подтвердили эти характеристики;
- оптимизирована, разработана и изготовлена неохлаждаемая радиально-осевая турбина с КПД по полным параметрам 0.895. Тестовые испытания практически подтвердили эти характеристики;
- спроектирована, изготовлена и испытана выносная малоэмиссионная камера сгорания, обеспечивающая заданную радиальную и окружную эпюры температур перед турбиной. И уровень выбросов  $\text{NO}_x < 7 \text{ мг/нм}^3$ .
- цикл микротурбинного генератора с регенерацией позволяет выполнить задачу создания МТГ с внутренним КПД не менее 34%. Полученные параметры и характеристики практически обеспечивают принятые оптимальные параметры тепловой схемы микротурбинного генератора;
- с помощью численных методов было выполнено расчётное исследование по определению прочностных характеристик основных узлов МТГ: турбины, компрессора, ротора и камеры сгорания;
- в процессе конструкторских проработок и прочностных расчетов была определена оптимальная форма рабочего колеса турбины – с удлиненной в осевом направлении выходной кромкой лопаток. Статическая прочность рабочего колеса турбины, изготовленного из сплава ЭП975-ИД, обеспечена – запас по пределу текучести больше 1.30; запас по пределу длительной прочности на 25000 часов близок к 1.50. [РТМ 108.022.106-86]. В процессе численных исследований были изучены характерные и наиболее опасные формы собственных колебаний рабочего колеса турбины. В процессе расчетов определены места наибольших напряжений РК компрессора – поверхность центрального отверстия и прикорневая часть входных кромок лопаток. В процессе выполнения конструкторских проработок и прочностных расчетов был выбран работоспособный вариант колеса компрессора, характеризующийся минимальной толщиной обода, равной 2мм;
- накоплен уникальный опыт технологического освоения производства газотурбинного оборудования в условиях использования современного машиностроительного комплекса по таким технологическим операциям как изготовление центробежных компрессоров, радиально-осевых турбин, газодинамических подшипников и др.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. **Беседин, С.Н.** Автономные газотурбинные установки малой мощности // Научно технические ведомости СПбГПУ 4-1(89) - 2009. - С.153-166.

2. **Беседин, С.Н.** Экспериментальный стенд для модельных испытаний радиально-осевой турбины газотурбинной установки малой мощности/ С.Н.Беседин, В.А.Рассохин, Г.А.Фокин, Г.Л.Раков // II Всероссийская научно-практическая конференция Актуальные проблемы машиностроения 6-8 апреля 2010. - г. Самара - С. 284-289.
3. **Беседин, С.Н.** Микротурбинный генератор электрической мощности 100 кВт (МТГ 100)/ С.Н.Беседин, В.А. Рассохин, Е.И. Окунев // Научно технические ведомости СПбГПУ - Сентябрь 2010. - С.57-61

Работы, опубликованные в других изданиях:

4. **Беседин, С.Н.** Результаты испытаний модельной камеры сгорания для газотурбинного двигателя мощностью 100 кВт/ С.Н.Беседин, Ю.В. Матвеев, В.В. Миронов, В.А. Рассохин // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы Международной научно-практической конференции 30.11-05.12 2009.- С.51.
5. **Беседин, С.Н.** Модернизация экспериментальных установок для исследования малорасходных турбин автономных источников электрической энергии малой мощности/ С.Н.Беседин, Ю.В. Матвеев, В.В. Миронов, В.А. Рассохин, С.Г. Раков // XXXVIII неделя науки СПбГПУ материалы международной научно-практической конференции 30.11-05.12 2009. - С.57-59.
6. **Беседин, С.Н.** Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильно развитой системой регенерации цикла/ С.Н.Беседин, Н.А. Забелин, С.Ю. Оленников, В.Г. Полищук, В.А. Рассохин, Г.Л. Раков, Г.А. Фокин // Инновационная политика и изобретатели (Россия –начало XXI века). 28 апреля 2009. - С.58-61.
7. **Беседин, С.Н.** Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности с расширительной турбиной/ С.Н.Беседин, Г.А. Фокин, И.С. Харисов // Журнал «Газотурбинные технологии». Январь 2010. № 1(82). С. 10-13.
8. **Беседин, С.Н.** Стенд для исследования высокооборотных модельных ступеней малорасходных турбин конструкции ЛПИ/ С.Н.Беседин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев, В.А. Рассохин, Г.Л. Раков, Г.А. Фокин // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке XVII Международная научно-методическая конференция. 11-12 февраля 2010. - Т.1 - С.262-263.
9. **Беседин, С.Н.** Расчетно-экспериментальные исследования малотоксичной камеры сгорания для газотурбинной установки малой мощности/ С.Н.Беседин, В.А.Асосков, Г.А.Фокин // Электронный журнал «Исследовано в России». № 002. – 2010. - С. 30-37.
10. **Беседин, С.Н.** Автономный источник электрической энергии для газораспределительных станций микротурбодетандерный генератор МДГ-20/ С.Н.Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин // ENERGY FRESH, №2. - Сентябрь 2010. - С. 60-62.