

**Харисов Ирек Саитгалиевич**

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИК, КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ И ПРАКТИЧЕСКАЯ  
РЕАЛИЗАЦИЯ МИКРОТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
профессор Забелин Николай Алексеевич,

Официальные оппоненты:

Бродов Юрий Миронович, доктор технических наук, кафедра «Турбины и двигатели», Уральский федеральный технический университет,  
профессор

Осипов Александр Вадимович, кандидат технических наук кафедра «Тепловые двигатели», Брянский технический университет, доцент

Ведущая организация:

ООО «Научно-технический центр «Микротурбинные технологии»,  
г.Санкт-Петербург

Защита состоится «10» декабря 2013 года в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд.118 в 18<sup>00</sup>

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.229.06, к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В текущем столетии, по многочисленным исследованиям экспертов, будет наблюдаться резкое возрастание роли природного газа в энергетике многих стран. Доля природного газа в мировом топливно-энергетическом комплексе, как ожидается, в первой половине XXI века возрастет до 30 %, а в России к 2015 году составит 57 %. Для достижения цели стабильного, бесперебойного и экономически эффективного удовлетворения постоянно возрастающего внутреннего и внешнего спроса на природный газ, энергетической стратегией России, на период до 2020 года, предусматривается сокращение потерь и снижение затрат на всех стадиях технологического процесса при добыче, подготовке и транспорте газа, а также решение задач ресурсо- и энергосбережения. Основные месторождения газа в России расположены на значительном расстоянии от крупных потребителей. Подача газа к ним осуществляется по газопроводам различного диаметра. На магистральном газопроводе вблизи крупных потребителей газа, для их газоснабжения, сооружаются газораспределительные станции. Подача газа с пониженным давлением потребителям от магистральных газопроводов высокого давления является основным назначением газораспределительных станций (ГРС).

При этом сама ГРС нуждается в энергоснабжении. Основными потребителями электроэнергии на ГРС являются: электропитание контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), насосы для принудительной циркуляции воды в системе отопления, либо электрообогрев помещений, внутреннее и наружное освещение, а также установки защиты от электрохимической коррозии металла труб газопроводов. Опыт создания и внедрения компьютеризованных комплексов коммерческого учета расхода газа и систем управления ГРС показывает, что одним из основных условий их успешного применения является наличие автономной системы энергоснабжения с длительным сроком службы. При этом указанное условие одинаково как для локально электрифицированных объектов, так и для объектов, которые подключены к электросети. Это обусловлено высокими требованиями измерительных систем и систем управления к качеству

электроэнергии, которые невозможно удовлетворить только за счет сетевого питания. Ненадежность линий электропередачи, вызывающая понижение напряжения или даже отключения сети из-за перегрузок и атмосферных явлений, отсутствие маневренного оборудования на электростанциях, а, следовательно, трудность регулировки и поддержания напряжения и частоты электрического тока - негативные явления, характерные для электрических сетей России и других стран СНГ. Таким образом, и при наличии сетевого питания, ГРС, оборудованные автономными источниками питания, имеют несомненные преимущества, т.к. эти источники позволяют исключить упомянутые выше негативные явления.

С точки зрения энергосбережения в газотранспортной системе, в частности на ГРС, сегодня весьма перспективной является утилизация энергии избыточного давления природного газа в турбодетандере. В представленной работе рассмотрена возможность использования энергии сжатого газа, которая раньше просто «выбрасывалась», для производства электрической энергии с помощью турбодетандера природного газа на газораспределительных станциях (ГРС) для их собственных нужд.

В связи с актуальностью поставленных задач по развитию автономных энергоисточников для покрытия собственных нужд на газораспределительных станциях и высокой востребованностью их на рынке локальных источников электрической энергии, были выполнены исследования по научно-техническому обоснованию и созданию микротурбодетандерных генераторов для ГРС. Всё вышесказанное определяет высокую **актуальность** диссертационной работы.

**Цели и задачи.** Целью диссертационной работы является научно-техническое обоснование и создание микротурбодетандерного генератора (МДГ) электрической энергии для собственных нужд ГРС с экономичностью и массогабаритными характеристиками, не имеющими аналогов в зарубежной и отечественной технике. Для достижения поставленной цели было необходимо использовать комплекс новых технических решений, не применявшихся ранее в отечественной энергетике. Подобные решения позволили выполнить вышеуказанные требования к МДГ и обеспечивают их широкое внедрение. К таким решениям относится применение

высокоэффективных малорасходных турбин конструкции ЛПИ, газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов.

- обосновать выбор режимных параметров и геометрических характеристик для создания микротурбодетандерных генераторов ГРС;
- разработать принципы построения конструктивной схемы перспективного микротурбодетандерного генератора;
- создать исследовательскую базу и технологическое оборудование для проведения натуральных испытаний;
- разработать методики проведения испытаний и обработки экспериментальных данных;
- провести расчётно-экспериментальные исследования малорасходной турбины, газодинамических подшипников и высокооборотного электрогенератора;
- обосновать прочностные характеристики МДГ;
- разработать конструктивный облик микротурбодетандерного генератора.

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

### **Научная новизна**

- на основании анализа потребления электрической энергии на собственные нужды ГРС обоснован выбор режимных параметров микротурбодетандерных генераторов для ГРС, обеспечивающий необходимый мощностной ряд (2...20 кВт) и оптимальную работу основных элементов МДГ (расширительной турбины, газодинамических подшипников, электрических генераторов).
- путем применения комплекса современных теоретических и экспериментальных исследований разработаны и обоснованы основные технические решения для создания отечественного микротурбодетандерного генератора. К таким решениям относятся: применение малорасходных турбин конструкции ЛПИ с внутренним КПД не менее 70% и температурой газа за турбиной не менее 278К; газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с преобразователями с частотой вращения ротора до 40000 об/мин;

- на основе трёхмерных исследований создана физическая модель течения газа в проточной части малорасходной расширительной турбины, которая позволяет оптимизировать процесс проектирования и оценивать влияние основных элементов турбины на её характеристики;
- в результате натурных исследований микротурбодетандерного генератора определены его характеристики в зависимости от начального давления и расхода рабочего тела через турбину, идентифицирована расчётная численная модель, уточнены постановка задачи и методика расчёта.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- обоснованы, исследованы и реализованы в конкретных конструкциях - малорасходная расширительная турбина, газодинамические подшипники и высокооборотный электрогенератор. Эти элементы МТГ послужили базовыми решениями при практической реализации и создании микротурбодетандерных генераторов для газораспределительных станций.
- разработана, создана и оснащена измерительными системами материально-техническая база для исследования натурных узлов, а именно: малорасходная расширительная турбина, газодинамические подшипники и высокооборотный электрогенератор.
- результаты исследований внедрены при разработке проекта и создании натурных опытных образцов микротурбодетандерного генератора мощностью 20 кВт.
- накоплен уникальный опыт технологического освоения производства турбинного оборудования в условиях использования современного машиностроительного комплекса.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использовались расчетно-экспериментальные методы исследования. При изучении физической картины течения проточной части микротурбодетандерного генератора применялись трехмерные численные методы расчета. При проведении натурных исследований использовались современные методы с использованием точного апробированного измерительного инструмента.

**Положения выносимые на защиту.** Результаты научного обоснования разработки и практической реализации создания современного микротурбодетандерного генератора; результаты теоретической разработки и натурных исследований характеристик микротурбодетандерного генератора; результаты комплексного подхода к созданию перспективного отечественного микротурбодетандерного генератора, связанные с использованием прототипов и поиском оптимальных термодинамических, газодинамических и конструктивных решений в условиях технологических ограничений имеющегося производственного оборудования

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечена: использованием в процессе выполнения работы в качестве базовых наиболее современных апробированных и тестированных методик на основе численного анализа в основных элементах микротурбодетандерного генератора; проведением натурных исследований по апробированным и научно обоснованным методикам на натурном оборудовании, прошедшем метрологическую аттестацию, с применением современных измерительных приборов и аппаратуры с минимальными погрешностями измерений; обработкой опытных данных с использованием устойчивых методов статистического анализа при совпадении результатов тестовых опытов с наиболее надёжными результатами других исследований. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях: Совместное заседание Научных советов РАН «Теплофизика и теплоэнергетика» и «Комплексные проблемы энергетики» 18 февраля 2010 г., Москва. Повестка дня: «Развитие малой энергетики в Российской Федерации. Состояние и перспективы». Международная научно-практическая конференция «XXXVIII неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 30 ноября - 05 декабря 2009 г. Три доклада: Международная конференция «Инновационная политика и изобретатели (Россия – начало XXI века)», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 28 апреля 2009 г.; XVII Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 11-12 февраля 2010 г.; 12-й

Петербургский международный энергетический форум, Санкт-Петербург, Ленэкспо, 18-20 сентября 2012 года. Золотая медаль на 6-й Международной ярмарке изобретений SIIF-2010, Сеул, 2– 5 декабря 2010 г.

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 5-ти печатных научных трудах.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести разделов и списка литературы. Она изложена на 196 страницах текста и содержит 105 рисунков, 26 таблиц и списка литературы из 60 наименований и 1 приложение.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показано место газораспределительных станций (ГРС) в единой системе газоснабжения РФ. Приведена структура и содержание диссертационной работы. Рассмотрены области применения микротурбодетандерных генераторов с расширительной турбиной (в литературе такие установки часто называют турбодетандеры). Сформулированы основные требования к микротурбодетандерным генераторам, показаны их преимущества и эффективность использования, обоснована актуальность темы диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ потребителей электрической энергии и диапазона изменения параметров природного газа на газораспределительных станциях ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». Основными потребителями электроэнергии на ГРС являются: электропитание контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), насосы для принудительной циркуляции воды в системе отопления, либо электрообогрев помещений, внутреннее и наружное освещение, а также установки защиты от электрохимической коррозии металла труб газопроводов. Как показал анализ, общая потребляемая электрическая мощность ГРС обычно не превышает 2...20 кВт при требовании III-ей категории надёжности электроснабжения. Электроснабжение ГРС предусматривается, как правило, от ближайшей ЛЭП через трансформаторную подстанцию с напряжениями 380/220 В. На нижерасположенном графике, в соответствии с



рисунком 1, изображено распределение потребностей ГРС типичного газопровода в электроэнергию по различным ГРС Северного управления ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург».

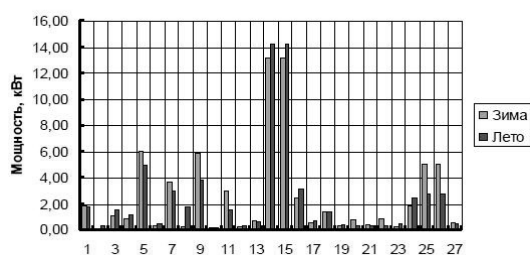


Рисунок 1. Распределение потребностей ГРС типичного газопровода в электроэнергию по различным ГРС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Выполнен обзор и рассмотрено состояние развития как отечественных, так и зарубежных микротурбодетандерных генераторов, производимых компаниями: АВВ, RMG, Rotaflow, Atlas Copco. Представлены их основные характеристики. Выполнен сравнительный анализ их показателей. Рассмотрены области применения и конструктивное исполнение.

Сформулированы цели и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке требований к расширительной турбине, выбору конструктивной схемы и характеристик турбодетандерной установки. Рассмотрены особенности работы турбодетандерной установки на ГРС, с учетом реальных физических свойств рабочего тела. Разработаны методы построения конструктивной схемы турбодетандерной установки с выбором типа и обоснованием расширительной турбины, подшипников, электрогенератора и преобразователя турбодетандерной установки. При создании нового класса микротурбодетандерных генераторов были использованы самые современные достижения науки, позволившие создать агрегат мирового уровня:

### ***Малорасходная расширительная турбина***



Рисунок 2. Малорасходная расширительная турбина

Эта турбина, представляет собой новый класс турбин (рисунок 2), характеризующийся следующими основными особенностями: малые объемные расходы рабочего тела, что особенно актуально при высоком уровне давлений в магистральном трубопроводе; возможность срабатывания значительных перепадов энтальпий и давлений при высокой экономичности; большой относительный шаг сопловых и рабочих лопаток; сверхзвуковые течения в сопловых и рабочих решетках турбины; повышенная эрозионная стойкость сопловых и рабочих лопаток и каналов.

**Высокооборотный синхронный генератор**, рисунок 3, выполненный с возбуждением на постоянных сверхсильных магнитах с высокой напряженностью магнитного поля, обладает следующими особенностями: простота конструкции и обслуживания – важнейший фактор для объектов автономной энергетики; обеспечивает надёжное возбуждение; имеет более высокие, по сравнению с аналогами, выходные, массогабаритные и шумовые характеристики; имеет простую систему охлаждения природным газом, прошедшим через турбину.

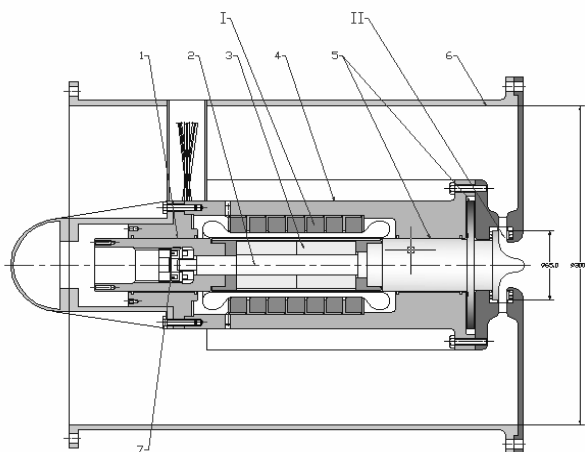


Рис.3. Высокоскоростной синхронный генератор с постоянными магнитами  
 I – синхронный генератор  
 II-малорасходная расширительная турбина  
 1- газодинамический подшипник  
 2- стяжка  
 3- постоянные магниты  
 4- корпус подшипника  
 5- газодинамический подшипник  
 6- корпус МДГ-20  
 7- стяжная гайка

**Лепестковые газодинамические подшипники (ЛГП)**, рисунок 4, обладают рядом преимуществ, свойственным подшипникам с газовой смазкой:

сохраняют работоспособность в широком диапазоне температур; обеспечивают высокую скорость вращения поддерживаемого вала – в частности для МДГ-20 эта скорость составляет 36000 об/мин; обладают экологической чистотой, так как используют в качестве смазки использующийся в качестве рабочего тела природный газ; исключают использование любых смазочных материалов, что способствует обеспечению простоты конструкции, а также существенному повышению взрыво- и пожаробезопасности ГРС.

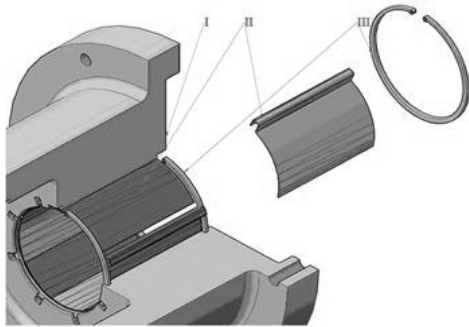


Рисунок 4. Лепестковый опорный газодинамический подшипник  
 I- корпус;  
 II- лепестки подшипника;  
 III-фиксатор подшипника

На основании выполненных исследований и накопленного опыта при проектировании подобных турбоустановок был разработан **микротурбодетандерный генератор**, конструктивная схема которого изображена на рисунке 5. Рабочее тело (природный газ) поступает в сопловой аппарат турбины конструкции ЛПИ, где расширяется и попадает в осевое рабочее колесо, вращающееся с частотой в диапазоне  $n = 0 \dots 40000$  об/мин. Крутящий момент с рабочего колеса передается на вал с газодинамическими подшипниками, на котором устанавливается роторная часть высокооборотного электрогенератора. Рабочее тело после рабочего колеса расширительной турбины поступает в выходной патрубок для охлаждения статора микротурбодетандерного электрогенератора .

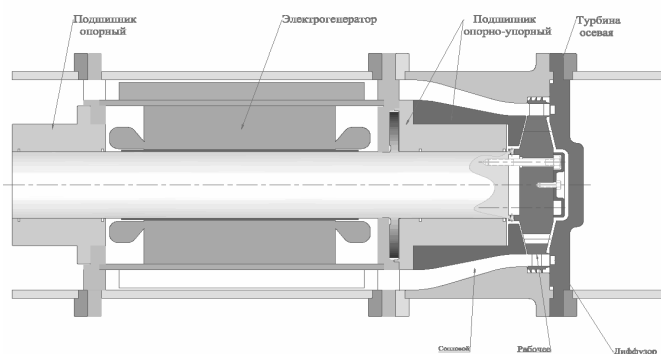


Рисунок 5. Конструктивная схема автономного источника электрической энергии

В третьей главе выполнен термодинамический анализ параметров тепловой схемы (рисунок 6) с расширительной турбиной, на основе оптимизационных расчётов (рисунок 7), обоснован выбор типа турбины, геометрических и режимных параметров проточных частей расширительной турбины, обоснован тип облопачивания соплового аппарата и рабочего колеса, проведен анализ переменных режимов расширительной малорасходной ступени для турбодетандерной установки.

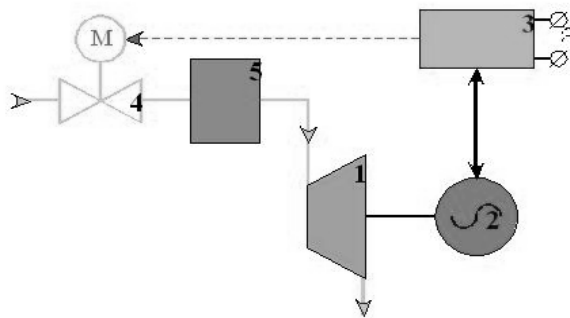


Рисунок 6. Тепловая схема автономной энергетической установки малой мощности с расширительной турбиной для газораспределительных станций

- 1 - расширительная турбина,
- 2- высокооборотный электрогенератор,
- 3- преобразователь (блок силовой электроники),
- 4- блок редуцирования,
- 5- подогреватель газа



Рисунок 7.

Расчетная схема математической модели МРТ

В результате выполненных работ был рассчитан, спроектирован, изготовлен, сертифицирован, испытан, и запущен в серию микротурбодетандерный генератор МДГ-20, номинальной мощностью 20 кВт, с возможностью кратковременного обеспечения повышенной мощности 25...26 кВт. Основные технические характеристики МДГ-20 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики МДГ-20

<b>Входные параметры:</b>	
Рабочее тело:	природный газ ГОСТ 5542-87
Давление газа, МПа	не более 5,4
Диаметр трубопровода, Ду, мм	50
Чистота газа, мкм	не более 10
<b>Выходные параметры:</b>	
Давление газа, МПа	0,1...0,9
Диаметр трубопровода, Ду, мм	100
Номинальная электрическая мощность, кВт	20
Номинальное выходное напряжение (линейное), В	380
Номинальное выходное напряжение (фазное), В	220
Число фаз	3+PE
Частота, Гц	50
Коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения, %	не более 12
<b>Общие параметры:</b>	
Скорость вращения ротора турбогенератора, об./мин	не более 40000
Расход редуцируемого газа, нм <sup>3</sup> /час	не более 1700
Перепад температуры по газу, °С	не более 42
КПД, %	не менее 70
Назначенный срок службы, год	20
Общее количество пусков	не более 2500
Установка экологически чистая	ГОСТ 12.1.005-88
Уровень шума в пределах нормы	ГОСТ 12.1.003-83
Сейсмическое воздействие по шкале MSK-64	Не менее 7 баллов

**В четвёртой главе** представлены результаты теоретического исследования расширительной малорасходной турбины МДГ-20 с помощью 3-х мерных численных методов. Выполнено исследование структуры потока в

расширительной малорасходной турбине и определены характеристики расширительной малорасходной турбины. Аналитическое описание пространственной структуры потока в этих условиях является сложной и малоизученной в турбостроении задач. Малые углы  $\alpha_1$  приводят к нарушению естественного характера течения и к некоторому снижению внутреннего КПД ступени. Использование трехмерных газодинамических расчетов на основе программного комплекса CFX позволяет повысить качество проектирования проточных частей (ПЧ) ступеней ЛПИ и обеспечить их конкурентоспособность. Первой детально исследованной ступенью является ступень ЛПИ диаметром 126 мм с углом выхода из СА  $\alpha_1 = 5^\circ$ , углом входа в РК  $\beta_1 = 10.5^\circ$ , без бандажа, степень парциальности  $\varepsilon = 0.612$ , осевой зазор (ОЗ)  $\Delta z_{03} = 3$  мм, проектная мощность 26 кВт (модель 605). Применение бандажа РК весьма эффективно и повышает  $\eta_B$  на 11,3%. Установлена необходимость уплотнения ПЧ с целью снижения осевого усилия. Обоснована необходимость оптимизации корневой перекрыши с целью повышения  $\eta_B$  и снижения осевого усилия.

В заключение необходимо отметить, что в работе приведены исследования традиционных методов повышения эффективности ПЧ турбинных ступеней. На базе анализа течения РТ в исследованных моделях выработаны нетрадиционные методы решения поставленных задач, которые, ввиду ограниченности рамок автореферата, не приводятся, но работы по исследованию выработанных направлений приведены в диссертации и продолжают в настоящее время на кафедре в СПбГПУ.

Пятая глава посвящена прочностному обоснованию турбины расширительной малорасходной турбины турбодетандерной установки МДГ-20. Выполнены расчеты и описание напряженно-деформированного состояния рабочего колеса, определены коэффициенты запаса прочности и вибрационные характеристики рабочего колеса турбины. Геометрия, скорость вращения и другие параметры рабочего колеса (РК) расширительной турбины выбраны на предварительном этапе исследований и уточнены в результате аэродинамического расчета. Формально все из рассмотренных материалов подходят для рабочего

колеса с коэффициентом запаса прочности больше 1,8. Предпочтение было отдано алюминиевому сплаву, лучше приспособленному для работы в области пониженных температур.

**В шестой главе** приведены материалы по экспериментальному и натурному (рисунок 8) стендам, объектам исследования (рисунки 9...12), методики проведения экспериментальных и натуральных исследований и обработки экспериментальных данных и натуральных результатов.

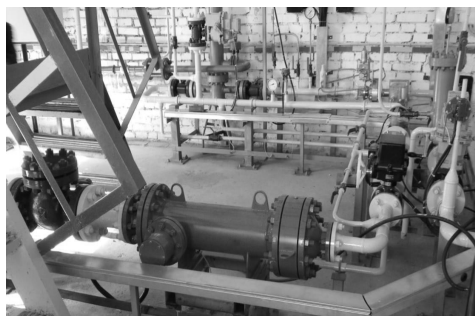


Рисунок 8. Натурный стенд для проведения испытаний МГД-20 на ГРС «Сертолово»

### **Объекты исследования элементов турбодетандеров**



Рисунок 9. Внешний вид высокооборотного электрогенератора турбодетандера



Рисунок 10. Рабочее колесо расширительной турбины



Рисунок 11. Сопловой аппарат расширительной турбины

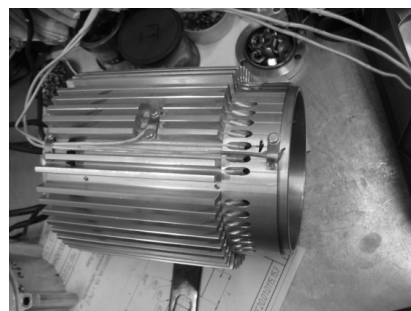


Рисунок 12. Высокооборотный электрогенератор

Ниже представлены (рисунок 13) результаты расчётно-экспериментальных и натуральных исследований расширительной турбины турбодетандерной установки МДГ-20 на ГРС «Сертолово».

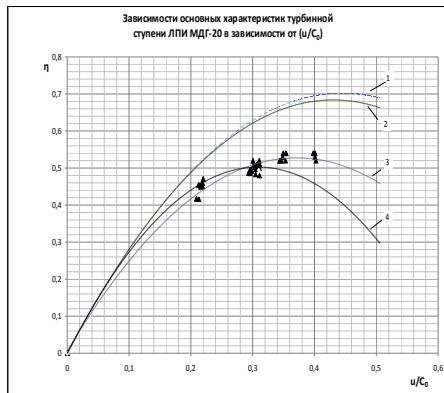


Рисунок 13. Зависимости основных характеристик турбинной ступени ЛПИ МДГ-20 в зависимости от  $(u/C_0)$

1 – расчётный окружной КПД для РК с бандажом; 2 – расчётный внутренний КПД для РК с бандажом; 3 – экспериментальный внутренний КПД для колеса без бандажа; 4 – расчётный внутренний КПД

На рисунках 14 и 15 приведены зависимости электрического КПД и электрической мощности МДГ-20 от расхода газа  $G$ , полученные при натуральных испытаниях.

Приведенные результаты исследований показали значительные потери энергии в электрической части МДГ-20, что является значительным резервом для его дальнейшего совершенствования.

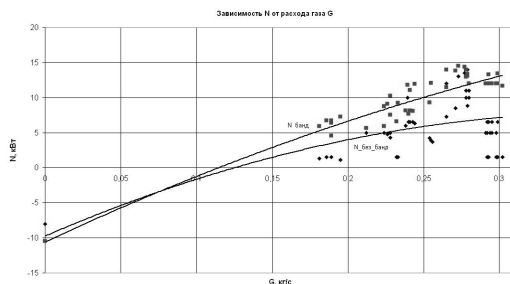


Рисунок 14. График зависимости электрического КПД МДГ-20 от расхода газа  $G$

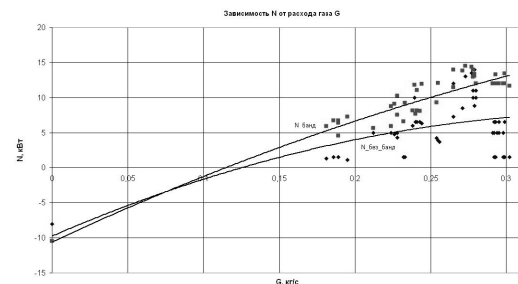


Рисунок 15. График зависимости электрической мощности МДГ-20 от расхода газа  $G$

## Заключение

1. В результате выполненных расчётно-экспериментальных исследований был обоснован выбор характеристик, конструктивной схемы и практически реализован микротурбодетандерный генератор МДГ-20, который прошел сертификацию, был испытан и запущен в опытную эксплуатацию.



2. Выполненный анализ потребителей электрической энергии на газораспределительных станциях (ГРС) позволил выбрать необходимый диапазон мощности разрабатываемых микротурбодетандерных генераторов, равный 10...20 кВт.
3. Обзор существующих конструкций турбодетандеров, выпускаемых промышленностью, показал отсутствие на рынке агрегатов подобной мощности с высокими массогабаритными характеристиками.
4. При создании МДГ-20 были обоснованы и применены новые технические решения основных узлов - малорасходная турбина конструкции ЛПИ, газодинамические подшипники, высокооборотный электрогенератор с частотой вращения ротора 36000 об/мин.
5. Численными методами была изучена физическая пространственная структура потока в проточных частях турбины для ступеней без бандажа и с бандажом, что позволило улучшить внутренний КПД на 9,3...11,9%.
6. На эффективность ступени оказывает существенное влияние величина надбандажной утечки рабочего тела и потери кинетической энергии рабочего тела на эжектирование пассивного газа в корне рабочих лопаток.
7. Отсутствие разгрузочных отверстий в исследованных ступенях не приводит к существенному росту осевого усилия, однако позволяет ощутимо повысить эффективность ступени.
8. Создана испытательная база для проведения промышленного эксперимента на ГРС, работающей в штатных режимах эксплуатации, при подаче на МДГ-20 части расхода газа ГРС, до 1700 нм<sup>3</sup>/час.
9. На ГРС "Сертолово" была выполнена серия промышленных экспериментов, показавшая работоспособность как установки в целом, так и системы охлаждения электрогенератора МДГ-20. Электрический КПД МДГ-20 при применении турбинной ступени без бандажа составил 26%, а для ступени с бандажом до 37,5%.
8. Комплекс проведенных экспериментальных и натурных исследований позволил провести сравнение полученных натуральных характеристик с расчётными данными

МДГ-20 на натуральных параметрах, показать их удовлетворительную сходимость и разработать рекомендации на совершенствование МДГ-20.

10. Выполненный объем расчетно-теоретических исследований, принятые в работе принципы конструирования и научно обоснованные технические решения позволили непосредственно подойти к рабочему проектированию и изготовлению опытного образца локального источника электроэнергии для газораспределительных станций, что дало возможность создать его опытный образец и приступить к его доводке в натуральных условиях.

### **Перечень публикаций автора по теме диссертации**

1. Харисов И.С., Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности с расширительной турбиной / С.Н. Беседин // Газотурбинные технологии. - 2010. - №1(82). - С.10-13.
2. Харисов И.С. Методика проведения экспериментальных исследований ступеней турбоустановок малой мощности на стендах СПбГПУ / В.А. Рассохин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев// Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. - № 1(142). - С. 119-123.
3. Харисов И.С. Разработка и создание нового класса автономных энергетических установок малой мощности для магистральных газопроводов, компрессорных и газораспределительных станций / С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Л.Л. Плаксин, Г.А. Фокин // Изд. Наука и техника в газовой промышленности. - 2010. - № 4. - С. 96-103.
4. Харисов И.С. Локальный источник электрической энергии для энергообеспечения объектов газотранспортной системы магистральных газопроводов / С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин // ENERGY FRECH. - № 3(5). - 2011. - С. 30-35.
5. Харисов И.С. Влияние уплотнений на эффективность малорасходных турбинных ступеней конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, А.А. Себелев, Г.А. Фокин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.- 2013. - № 3 (178). - С. 32-42.