

На правах рукописи



ФОКИН Георгий Анатольевич

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНЫХ ТУРБИННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГИЮ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ
СИСТЕМЫ РОССИИ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант доктор технических наук, профессор Рассохин Виктор Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Бродов Юрий Миронович, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

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

Агабабов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Центр энергетических обследований ОАО «ВТИ», профессор кафедры «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский институт Московский энергетический институт»

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана».

Защита состоится «16» февраля 2016 г. в «16» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 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 www.spbstu.ru ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.06



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Доля природного газа в мировом топливно-энергетическом комплексе, как ожидается, в первой половине XXI века возрастет до 30 %, а в России к 2015 году достигнет более 60%. Для достижения стабильного, бесперебойного 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.

Россия является мировым лидером по добыче газа. Для доставки этого топлива на электростанции и другим потребителям газа была построена единая газотранспортная система (ГТС), включающая развитую сеть магистральных газопроводов (МГ), компрессорных станций (КС), газораспределительных станций (ГРС), газораспределительных пунктов (ГРП) и щитов (ГРЩ) и др.

Устойчивая тенденция снижения надежности электроснабжения от внешних сетей являлась одним из основных факторов при принятии решения в ОАО «Газпром» о развитии собственной энергетической базы на основе применения собственных источников электрической энергии.

Применение собственных автономных энергоисточников для электроснабжения линейных потребителей основывается на анализе и определенном опыте Газпрома, России и европейских стран. В настоящее время в Европе активно используются не только традиционные энергоустановки, но и энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии (солнечные фотоэлементы, топливные элементы, термоэлектрогенераторы, ветроустановки и др.).

На объектах Газпрома применяются автономные источники импортного и отечественного производства («Капстон», «Ормат», «Глобал Электрик», КАТОФ, КАТОИ и другие). Однако их применение не носит массового характера, и они обладают высокой стоимостью. Из всего сказанного можно сделать вывод, что при правильной организации работы и высокой ответственности исполнителей возможно успешное внедрение автономных источников энергии для электроснабжения газотранспортной системы.

На решение указанных задач и направлена настоящая работа. В диссертации предлагается **концепция** использования энергии сжатого природного газа для выработки электрической энергии в турбогенераторах на собственные нужды газотранспортной системы и, возможно, для внешних потребителей. Механическая энергия, необходимая для транспортировки газа и компенсации гидравлических потерь в МГ, вырабатывается, в основном, в газотурбинных агрегатах. Для получения этой энергии в камерах сгорания турбин на каждой КС сжигается 0,2...0,3% от расхода,

перекачиваемого через станцию газа. При транспортировке газа от мест его добычи (например, в Западной Сибири) до конечного потребителя (страны Европейского экономического сообщества) в камерах сгорания сжигается до 6...7% от общего объема перекачиваемого газа. На каждой из последующих КС топливный газ дросселируется (редуцируется) от давления в 5,4...10,0 и выше МПа до давления топливного газа 2,0...3,6 МПа. При этом энергия давления газа полностью теряется, то есть фактически теряется энергия, сожженного на предыдущих станциях топливного газа.

При подаче природного газа конечному потребителю также необходимо снижать давление газа на газораспределительных станциях (ГРС), компрессорных станциях (КС), газораспределительных пунктах (ГРП) и щитах (ГРЩ), то есть редуцировать газ от давления в магистральном газопроводе до давления потребителя (0,15...3,0 МПа). При этом по ныне существующей технологии, энергия давления газа также полностью теряется, то есть теряется та энергия, которая была передана газу на предыдущих КС.

Предлагаемая **концепция** создания турбогенераторов (ТГ), использующих энергию сжатого газа для собственных нужд, позволяет создавать экологически чистые источники, генерирующие электрическую энергию, без сжигания при этом дополнительного топлива. Внедрение концепции позволит решить задачи повышения энергоэффективности работы газотранспортной системы, эффективности использования потенциала органических источников тепловой энергии – природного газа. Создание турбогенераторов электрической энергии для автономного обеспечения собственных нужд газотранспортной системы, с экономичностью и массогабаритными характеристиками, не имеющими аналогов в зарубежной и отечественной технике, чрезвычайно **актуально**.

Для достижения поставленной цели необходимо было использовать комплекс новых технических решений, определяющих новый класс турбогенераторов электрической энергии, не применявшихся ранее в отечественной энергетике. Новые технические решения позволили выполнить сформированные требования к турбогенераторам газотранспортной системы и обеспечить их широкое внедрение. К таким решениям относится применение высокоэффективных малорасходных высокоэффективных малорасходных турбин конструкции ЛПИ, газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с преобразователями.

Выполненные исследования и разработки являются чрезвычайно актуальными и востребованными, особенно в условиях курса, принятого руководством страны на импортозамещение, поскольку отечественных аналогов практически не существует, а зарубежные аналоги стоят очень дорого.

Обоснование и практическая реализация вышеуказанной **концепции** было выполнено на базе предприятий ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» - одно из крупнейших газотранспортных предприятий России. ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» - 100-процентная дочерняя организация ОАО «Газпром», эксплуатирует более 10,7 тысяч километров газопроводов, 240 газораспределительных станций и 32 компрессорных цеха, в которых установлены 192 газоперекачивающих агрегата суммарной мощностью 1795 МВт.

В связи с актуальностью поставленных задач по развитию автономного энергоснабжения газотранспортной системы России (ГТС) и высокой востребованностью на рынке локальных источников электрической энергии, были выполнены исследования по научно-техническому обоснованию, разработке принципов проектирования и созданию нового класса турбогенераторов на собственные нужды ГТС, использующих энергию сжатого природного газа. Всё вышесказанное определяет высокую **актуальность** диссертационной работы.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка методологии разработки и создание нового класса турбогенераторов (ТГ), использующих энергию сжатого природного газа для выработки электрической энергии для собственных нужд газотранспортной системы (ГТС) России. Экономичность, массогабаритные характеристики и надёжность турбогенераторов (ТГ) должны превышать лучшие аналоги зарубежной и отечественной техники.

Задачи исследования.

- выполнение анализа и обоснования количества необходимой электрической энергии на собственные нужды для основных составляющих газотранспортной системы России;
- определение возможности выработки электрической энергии основными составляющими газотранспортной системы России для собственных нужд и внешних потребителей;
- обзор и анализ различных автономных источников электрической энергии, оценка их преимуществ и недостатков, выбор и обоснование наиболее перспективных и, в полной мере, удовлетворяющих сформулированным требованиям;
- выбор режимных параметров и геометрических характеристик турбогенераторов для создания турбогенераторов газотранспортной системы России;
- разработка мощностного ряда нового класса турбогенераторов;
- выбор и обоснование основных элементов унифицированных турбогенераторов;
- разработка основных принципов проектирования расширительных турбин турбогенераторов электрической энергии;
- создание научно-исследовательской базы и технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований и натурных испытаний;
- разработка методик проведения испытаний и обработки экспериментальных данных;

- проведение расчётно-экспериментальных исследований расширительной турбины, газодинамических подшипников и высокооборотного электрогенератора унифицированных турбогенераторов;
- проведение численного эксперимента в трёхмерной постановке расширительной турбины конструкции ЛПИ турбогенератора с целью изучения физической картины течения рабочего тела в проточной части и оценки характеристик расширительной турбины;
- обобщение экспериментальных характеристик, исследованных МРТ разного типа с целью использования таких турбин в турбогенераторах;
- разработка конструкций, создание и доводка опытных образцов унифицированных турбогенераторов.

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

Научная новизна работы.

1. Выполненный анализ основных показателей различных автономных источников электрической энергии (АИЭЭ) для газотранспортной системы России (экономичность (КПД), стоимостные показатели ($C_{\text{э}}$), показатели приведенного объёма (V/N) и массы (m/N) показал, что наиболее полно сформированным требованиям к автономным источникам электрической энергии для газотранспортной системы России удовлетворяют турбогенераторы (турбодетандерные электрогенераторы), так как они утилизируют собственные энергетические ресурсы газотранспортной системы, просты и надёжны в эксплуатации.

2. На основании анализа потребления электрической энергии на собственные нужды ГТС обоснован выбор режимных параметров турбогенераторов, обеспечивающий необходимый мощностной ряд основных потребителей (линейные вдольтрассовые потребители магистральных газопроводов, компрессорные станции, газораспределительные станции, газораспределительные пункты и щиты) электрической энергии на собственные нужды газотранспортной системы России.

3. Обоснованы оптимальные тепловые схемы турбогенераторов электрической энергии на собственные нужды ГТС, использующих энергию сжатого газа.

4. На основе выполненного анализа малорасходных турбин для применения в турбогенераторах рассматриваемого класса в качестве расширительных турбин обосновано применение турбин конструкции ЛПИ при удовлетворении комплекса пропускной способности

$$A = 4 \cdot \frac{\ell_1}{D_{\text{сп}}} \cdot \varepsilon \cdot \sin \alpha_1 < 0,02.$$

При равных значениях пропускной способности турбины

конструкции ЛПИ имеют на (8...15) % КПД выше традиционных парциальных малорасходных

турбин, более технологичны в изготовлении, износостойкие, позволяют срабатывать большие теплоперепады энтальпий.

5. Результаты трёхмерных исследований физической модели течения газа в проточной части малорасходной расширительной турбины конструкции ЛПИ позволили оптимизировать процесс проектирования, оценить влияние основных элементов турбины на её характеристики и выработать рекомендации по дальнейшему совершенствованию расширительных турбин турбогенераторов.

6. Экспериментальные характеристики модельных расширительных турбин конструкции ЛПИ турбогенераторов малой мощности достигли следующих модельных параметров $p_0=0,247$ МПа, $T_0=320$ К, $n=26100$ об/мин, $G=0,067$ кг/с. Уровень КПД в варианте МРТ с РК без бандажа составил 59% при $u/C_0=0,45$, а с РК с бандажом 67,5% при $u/C_0=0,455$.

7. Экспериментальные характеристики модельных расширительных турбин конструкции ЛПИ для применения их в микротурбогенераторах малой мощности вышли на следующие модельные параметры $p_0=0,4$ МПа, $p_2=0,2$ МПа $T_0=320$ К, $n=9000$ об/мин. Уровень мощности в зависимости от числа сопел составил от 20 до 400 Вт, что соответствует расчётным характеристикам.

8. Результаты натурных исследований микротурбогенераторов малой мощности и микротурбогенераторов, их характеристики в зависимости от начального давления и частоты вращения ротора турбины.

Практическая значимость работы.

1. Разработан и обоснован новый класс автономных турбинных источников электрической энергии (турбогенераторов), использующих энергию сжатого природного газа для газотранспортной системы России. Электрическая мощность предложенных турбогенераторов, обеспечивающих собственные нужды линейных магистральных газопроводов, газоперекачивающих станций, газораспределительных станций, газораспределительных пунктов и щитов лежит в диапазоне от нескольких десятков ватт до 500...550 кВт.

2. Обоснованы и реализованы в конкретных конструкциях расширительные турбины конструкции ЛПИ, газодинамические подшипники, подшипники с консистентной смазкой и высокооборотные синхронные электрогенераторы на постоянных магнитах с преобразователями. Эти элементы послужили базовыми решениями при практической реализации и создании турбогенераторов для газотранспортной системы России.

3. Создана и оснащена измерительными системами материально-техническая и испытательная база для исследования экспериментальных и натурных узлов и микротурбогенераторов и турбогенераторов малой мощности.

4. Накоплен уникальный опыт технологического освоения производства турбогенераторов малой мощности в условиях использования современного машиностроительного комплекса по таким технологическим операциям как изготовление расширительных турбин, газодинамических подшипников, высокооборотных электрогенераторов и других изделий. Для уменьшения массы микротурбогенераторов, а также обеспечения возможности применения современных методов изготовления, было принято решение об изготовлении микротурбогенератора, включая корпус, сопловой аппарат и рабочее колесо, из высокопрочной пластмассы методом селективного лазерного спекания (SLS), с использованием 3D-принтера.

5. Результаты исследований внедрены при разработке проекта и создании натуральных опытных образцов микротурбогенераторов и турбогенераторов малой мощности.

Личный вклад. Разработка концепции создания турбогенераторов (ТГ), использующих энергию редуцирования газа, позволяющая создавать экологически чистые источники, генерирующие электрическую энергию на собственные нужды газотранспортной системы (ГТС), без сжигания при этом дополнительного топлива. Внедрение концепции повышения энергоэффективности работы газотранспортной системы России. Обоснование выбора режимных параметров микротурбогенераторов и турбогенераторов малой мощности, обеспечивающий необходимый мощностной ряд. Участие в научно-техническом обосновании выбора оптимальных параметров и конструктивных решений при проектировании основных узлов. Участие в разработке оборудования стендов для исследования натуральных узлов турбогенераторов, их наладке, разработке и тестировании системы измерений, Организация проведение испытаний и обработки полученных результатов. Участие в разработке и практического создания конструкции турбогенератора мощностью 20 кВт нового поколения, как результат реализации комплекса методов проектирования в технологически ориентированном направлении впервые в отечественной практике.

Достоверность и обоснованность полученных 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 натуральных 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.

На защиту выносятся:

- **концепция** создания турбогенераторов (ТГ), использующих энергию редуцирования газа, позволяющая создавать экологически чистые источники, генерирующие электрическую энергию на собственные нужды газотранспортной системы (ГТС), без сжигания при этом дополнительного топлива;
- результаты научного обоснования разработок, принципы проектирования и практическая реализация создания современных микротурбогенераторов и турбогенераторов малой мощности, использующих энергию редуцирования газа для выработки электроэнергии на собственные нужды газотранспортной системы России;
- результаты теоретических разработок, экспериментальных и натурных исследований характеристик микротурбогенераторов и турбогенераторов малой мощности;
- результаты комплексного подхода к созданию перспективных отечественных турбогенераторов, связанные с использованием 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, выставках конференциях (некоторые из них):

- 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 конференция «Инновационная политика и изобретатели (Россия – начало XXI века)», Санкт-Петербург, СПбПУ, 28 апреля 2009 г.
- 12-й Петербургский международный энергетический форум, Санкт-Петербург, Ленэкспо, 18-20 сентября 2012 года.
- 6-я Международная ярмарка изобретений SIF 2010. Дипломом первой степени, золотой медалью и специальным призом республики Польша отмечена разработка коллектива авторов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбПУ) «Малорасходная центростремительная парциальная турбина».
- 31 октября 2010 г. Всемирная универсальная выставка ЭКСПО-2010 в Шанхае. За работу «Автономные источники электрической энергии» серебряными медалями и дипломами отмечены: ООО НТЦ «Микротурбинные технологии»; СПбПУ, ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»; ЦКТИ им. Ползунова.
- 17...20 мая 2011 выставка «Энергетика и Электротехника». Дипломом за развитие энергетического комплекса, продвижение электротехнической продукции на российский рынок и активное участие в выставке «Энергетика и электротехника».
- 22-ая международная выставка «Изобретения, инновации и технологии» ITEX 2011, Малайзия г. Куала-Лумпур. Получена золотая медаль и специальный приз за лучшую

разработку в области защиты окружающей среды.

- 19 июня 2012 РОС – ГАЗ – ЭКСПО 2012. Экспонаты получили высокую оценку специалистов. Экспоненты были награждены дипломом участника XVI Международной специализированной выставки газовой промышленности и технических средств для газового хозяйства «Рос – Газ – Экспо 2012».
- 2...5 декабря 2010 г. Золотая медаль на 6-й Международной ярмарке изобретений SIIF-2010, Сеул.
- 1...4 ноября 2012, Германия, г. Нюрнберг. 64-я Международная выставка «Идеи – Изобретения – Новые Продукты» IENA-2012. Получена серебряная медаль.
- 28 ноября...1 декабря 2014, Республика Корея, г. Сеул. Seoul International Invention Fair 2014 (SIIF 2014). Получена бронзовая медаль.
- Золотая медаль на 6-й Международной ярмарке изобретений SIIF-2010, Сеул, 2... 5 декабря 2010 г.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 24-х печатных научных трудах, из них 13 печатных научных трудов перечня ВАК.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана роль и место Единой газотранспортной системы России (ГТС) в обеспечении потребностей в энергии различного вида промышленного производства и коммунально-бытового хозяйства страны. Показана необходимость применения собственных автономных энергоисточников в ОАО «Газпром», что является актуальной проблемой. На базе ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», одного из крупнейших газотранспортных предприятий России, сформулирована **концепция** создания турбогенераторов (ТГ), использующих энергию сжатого природного газа на собственные нужды ГТС, позволяющая создавать экологически чистые источники, генерирующие электрическую энергию, без сжигания при этом дополнительного топлива.

В первой главе сформулированы основные требования к автономным источникам электроэнергии для газотранспортной системы России. Выполнен обзор существующих автономных локальных источников электрической энергии малой мощности. Определены их преимущества и недостатки.

С целью выбора оптимальных автономных источников электрической энергии для газотранспортной системы и определения сравнительных эксплуатационных, экономических, стоимостных массогабаритных и других показателей было выполнено расчётное исследование различных автономных источников. Результаты этих исследований приведены на рисунках 1...3.

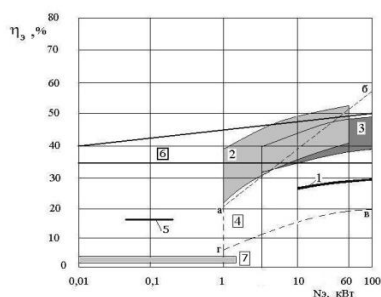


Рисунок 1. Зависимость КПД автономных источников электроэнергии линейных потребителей от мощности

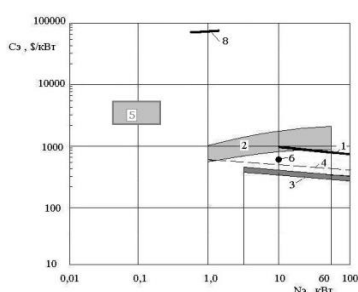


Рисунок 2. Зависимость стоимости киловатта установленной мощности автономных источников электроэнергии от мощности

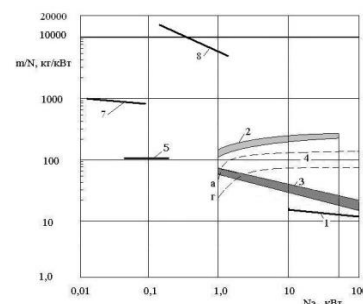


Рисунок 3. Зависимость приведенной массы m/N автономных источников электроэнергии от мощности

1–электрогенераторы с приводом на основе микротурбин; 2–ветроэнергетические агрегаты; 3–газопоршневые электроагрегаты; 4 –турбодетандеры; 5–модули с солнечными фотоэлементами, по данным фирмы INVERTA (Москва); 7–термоэлектрогенераторы; 8– установки на основе термоэлектрогенераторов (КАТЭУ и АИП)

Выполненные исследования показали, что наиболее полно сформированным требованиям к автономным источникам электрической энергии для газотранспортной системе России удовлетворяют турбодетандерные электрогенераторы (турбодетандеры). Они утилизируют собственные энергетические ресурсы газотранспортной системы, просты и надёжны в эксплуатации. В дальнейшем будем турбодетандерные электрогенераторы (турбодетандеры) называть:^{1*}

- микротурбогенераторы (МТГ-УСЖГ) – электрическая мощность до 1кВт;
- турбогенераторы малой мощности (ТГММ - УСЖГ) - мощность до 500 кВт;
- турбогенераторы большой мощности (ТГБМ - УСЖГ) - мощность свыше 500 кВт.

«УСЖГ» означает - утилизация сжатого газа.

Из числа рассмотренных турбодетандерных генераторов производства зарубежных фирм, России, стран СНГ полностью ни один агрегат не соответствует рассматриваемой задаче – служить в качестве автономного компактного источника электроснабжения, использующего энергию сжатого природного газа, для собственных нужд газотранспортной системы России. В основном, все они были спроектированы и изготовлены под другую задачу – утилизация максимально возможного количества энергии. Они имеют высокие массогабаритные характеристики (за счёт низкой частоты вращения электрогенератора и необходимости применения механического редуктора).

¹ Детандер по определению – это машина для снижения температуры газа путём его охлаждения с выполнением внешней работы.

Кроме того, они имеют, как правило, масляную систему смазки (высокая пожароопасность) или магнитные подшипники (высокая стоимость).

Выполненный анализ показал необходимость разработки турбогенераторов (ТГ), использующих энергию сжатого природного газа для выработки электрической энергии для собственных нужд газотранспортной системы (ГТС) России турбогенераторов (ТГ). Электрогенераторы на основе микротурбин малой мощности могут быть рекомендованы для использования для вдольтрассовых потребителей магистральных газопроводов. В первом разделе сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена анализу и обоснованию величины необходимой электрической энергии на собственные нужды основных составляющих газотранспортной системы. Рассмотрена возможность выработки электрической энергии основными составляющими газотранспортной системы для внешних потребителей. Анализ и обоснование выполнен на примере газотранспортной системы (МГ) ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». Типовой участок газотранспортной системы приведен на рисунке 4. На этой схеме приведены основные потребители и производители электрической энергии на собственные нужды ГТС (вдольтрассовые линейные потребители магистральных газопроводов (ЛВПМГ), компрессорные станции (КС), газораспределительные станции (ГПС), газораспределительные пункты (ГРП) и щиты (ГРЩ), внешние потребители (ВП)).

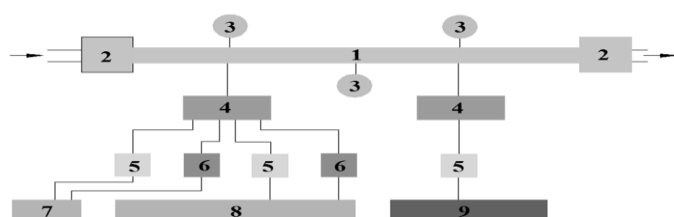


Рисунок 4. Типовой участок газотранспортной системы

- 1 - магистральный газопровод.
- 2 - компрессорные станции.
- 3 - вдольтрассовые линейные потребители магистральных газопроводов.
- 4 - газораспределительные станции.
- 5 - газораспределительные пункты.
- 6 - газораспределительные щиты.
- 7 - объекты газонефтяных месторождений (собственные нужды).
- 8 - объекты малых, средних и крупных населенных пунктов, городов.
- 9 - электростанции, промышленные предприятия

Линейные потребители магистральных газопроводов

В состав линейных потребителей магистральных газопроводов входят:

- крановые узлы магистральных газопроводов (КУ);
- контролируемые пункты телемеханики (КПТМ);
- промежуточные радиорелейные станции (ПРС);
- радиорелейные станции (РРС);

- станции катодной защиты (СКЗ).

Характеристики линейных потребителей магистральных газопроводов

Таблица 1

Потребители	Количество	Напряжение	Мощность
КПТМ	221 шт.	0,22 кВ	0.5...3 кВт
СКЗ	820 шт.	0,22 кВ	3 кВт
Связь (РРС, ПРС)	22 шт.	0,4 кВ	10 кВт

Для обеспечения всех линейных потребителей МГ ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» необходимо до 35 МВт электрической мощности.

Компрессорные станции (КС), (ГПС)

Компрессорная станция предназначена для компримирования природного газа при его транспортировании по магистральному газопроводу. Для сжатия природного газа используют, в основном, газотурбинные установки (ГТУ), работающие на топливном газе, редуцированном от давления в магистральном газопроводе до давления, необходимого для организации рабочего процесса в ГТУ. Основными критериями, определяющим возможность получения электрической энергии на КС, являются выбор параметров редуцирования и расход газа по соответствующим газопроводам. Анализ работы компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» представлен в таблице 2.

Годовой расход редуцируемого газа по различным направлениям использования КС, включая котельную и электростанцию собственных нужд (ЭСН).

Таблица 2

№ п/п	Станция	Годовой расход газа, м ³			
		топливного	пускового	импульсного	Котельная + Э
1	КС Волхов	42357535,000	36088,000	1633,000	136858,000
2	КС Пикалево	36594126,000	57007,000	1112,000	190223,000
3	КС Северная	23354340,000	н/д	690,000	1100,000
4	КС Новгород	3341338,000	33385,000	360,000	206204,000
5	КС Изборск	13478457,000	1192,000	167,000	142701,000
6	КС БИС	31549200,000	133265,000	684,000	135925,000
7	КС Торжок	145206310,00	146358,000	505,000	95802,000
8	ОПКС	13700439,000	89037,000	869,000	377197,000
9	КС Ржев	122507500,00	239807,000	16400,000	120319,000
10	КС Ржев (КЦ5)	28405930,000	40910,000	3310,000	104578,000
11	КС ХолмЖирки(КЦ5)	79898705,000	6957,000	558,000	75902,000
12	КС Смоленск (КЦ5)	89366996,000	25752,000	3400,000	65351,000
13	КС Смоленская	н/д	1897,000	3742,000	684805,000
Итого		629760876,00	813495,000	33497,000	2878561,000

Видно, что годовой расход топливного газа газоперекачивающих станций (ГПС) значительно превосходит расходы природного газа по другим направлениям использования. Исходя из таблицы 1, можно сделать вывод, что наиболее перспективными направлениями получения электрической энергии для собственных нужд ГПС, и возможно для внешних потребителей, является использование расширительных турбин для редуцирования топливного природного газа.

Выполненный в работе анализ показал, что среднегодовая базовая потребность в электрической энергии на собственные нужды компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (13 ед.) составляет 350...600 кВт на одну станцию, без учета работы аппаратов воздушного охлаждения (АВО). Суммарная потребность в электрической энергии на собственные нужды всех компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» составляет 5250...9000 кВт.

Газораспределительные станции (ГРС)

Снабжение газом потребителей от магистральных и промышленных газопроводов является основным назначением газораспределительных станций ГРС.

Основными потребителями газа являются:

1. Объекты газонефтяных месторождений (собственные нужды);
2. Объекты газоконпрессорных станций (собственные нужды);
3. Объекты малых, средних и крупных населённых пунктов, городов;
4. Электростанции, промышленные предприятия.

Следовательно, ГРС располагается на границе между магистральными и распределительными газопроводами. Перед подачей газа потребителям, необходимо понизить давление газа до необходимого уровня.

ГРС выполняет следующие функции:

- очищает газ от механических примесей и конденсата;
- редуцирует газ до заданного давления и поддерживает его с заданной точностью;
- измеряет и регистрирует расход газа;
- осуществляет одоризацию газа перед подачей потребителю;
- обеспечивает подачу газа потребителю в соответствии с ГОСТ 5542-87.

Узлы основного технологического блока ГРС:

- узел переключения (УПР);
- узел очистки газа (УО);
- узел замера расхода газа (УЗ);
- узел подогрева газа (УП);
- узел редуцирования (УР);

- узел одоризации газа (ОУ).

Эти узлы составляют основной технологический блок ГРС. Кроме основного технологического блока в состав ГРС входят:

- блок управления;
- блок источников контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА).

Узлы блока управления КИПиА связаны функционально и соответствуют узлам основного технологического блока. Также ГРС имеет укрытия для основных блоков, дом операторов (на отдельной площадке) и вспомогательные блоки связи, электрохимической защиты, охранной сигнализации.

Потребности ГРС в электричестве и тепле зависят от многих факторов, основными из которых являются: назначение, месторасположение, размеров, расчётная зимняя температура воздуха, нормативная снеговая нагрузка, нормативная ветровая нагрузка и т.д. В зависимости от удалённости от крупных населённых пунктов и от формы обслуживания рядом со станцией строятся дома операторов, для проживания обслуживающего персонала, которые тоже нуждаются в тепловой и электрической энергии. Также газораспределительные станции часто оснащаются котельными.



Рисунок 5. Потребности различных ГРС в электрической мощности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

На рисунке 5 отражено распределение потребностей ГРС в электрической энергии в Северной ЛПУ ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург».

Установлено, что среднегодовая потребность в электрической энергии на собственные нужды большинства газораспределительных станций ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (24 ед.) составляет 2...20 кВт на одну станцию. Суммарная потребность в электрической энергии на собственные нужды всех газораспределительных станций ООО «Трансгаз Петербург» составляет 54...378 кВт.

Газораспределительные пункты и щиты

Газораспределительные пункты и шкафные распределительные пункты предназначены для снижения давления газа и поддержания этого давления в заданных

пределах. Основным потребителем электрической энергии являются устройства телеметрии. В ГРП кроме этого могут присутствовать и другие потребители электроэнергии: система автоматики (СА), охранно-пожарная сигнализация (ОПС), освещение, узел учета.

Телеметрия является маломощным приемником электроэнергии и в активном режиме (при опросе комплексом внешних устройств (датчиков) и при осуществлении сеансов связи с ЭВМ верхнего уровня) потребляет – 4,4Вт; в пассивном («спящем») режиме – 0,1 мВт. Для работы требуется постоянное напряжение 24 В.

Среднегодовая потребность в электрической энергии на собственные нужды газораспределительных пунктов ООО «Газпром газораспределение» (свыше 1000 ед.) составляет 0,3...1,0 кВт на один пункт.

Внешние потребители

Определены возможные производители электрической энергии газотранспортной системы, как на собственные нужды, так и для внешних потребителей: компрессорные станции (15), газораспределительные станции (27). Их мощностной потенциал составляет не менее 100 МВт.

В третьей главе, на основе выполненного расчётного исследования тепловых схем турбогенераторов, показано, что для разработки турбогенераторов электрической энергии на собственные нужды для компрессорных станций, газораспределительных станций, газораспределительных пунктов и щитов газотранспортной системы, внешних потребителей электрической энергии, целесообразно применение турбогенераторов электрической энергии, выполненных по схеме, приведенной на рисунке 7.

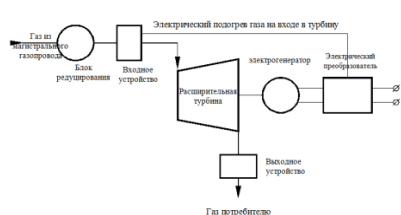


Рисунок 6. Простая тепловая схема с расширительной турбиной и электрическим подогревом газа

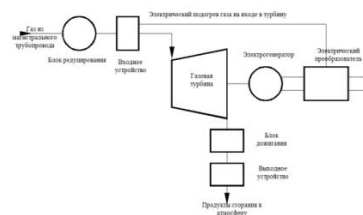


Рисунок 7. Тепловая схема с дожиганием топлива и электрическим подогревом природного газа на входе в турбину

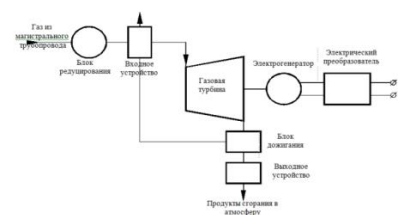


Рисунок 8. Тепловая схема с расширительной турбиной, с дожиганием топлива и подогревом газа на входе в турбину в теплообменнике продуктами сгорания

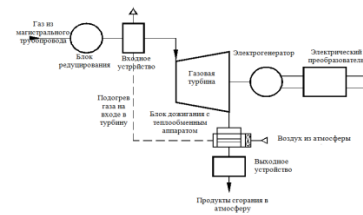


Рисунок 9. Тепловая схема с расширительной турбиной, с дожиганием природного газа и подогревом газа на входе в турбину в теплообменнике воздухом

Для разработки турбогенераторов вдольтрассовых потребителей магистральных газопроводов газотранспортной системы России целесообразно применение турбогенераторов электрической энергии, выполненных по схемам, приведенным на рисунках 6, 7, 8.

Для таких потребителей возможно также применение микротурбинных генераторов несмотря на то, что стоимость их значительно выше.

Рассматриваемая схема (рисунок 6) включает подогрев газа на входе в расширительную турбину и блок дожигания, исключающий выброс природного газа в атмосферу. Схемы с электроподогревом потенциально более безопасны, чем схемы с нагревом газа путем его сжигания, но требуют большого расхода электроэнергии. Рассматриваемая схема (рисунок 7) включает подогрев газа на входе в газовую турбину теплом, образующимся в результате сгорания газа в блоке дожигания после расширительной турбины. Для подогрева направляется часть продуктов сгорания, необходимая для поддержания температуры рабочего тела, остальная часть продуктов сгорания выбрасывается через выходное устройство в атмосферу. Такая организация рабочего процесса также исключает выброс транспортируемого газа в атмосферу, и позволяет обойтись без дополнительных затрат электроэнергии. К недостаткам схемы следует отнести сложность обеспечения безопасного процесса, поскольку подогрев должен осуществляться продуктами сгорания непосредственно.

Рассматриваемая схема (рисунок 8) избавлена от недостатка, связанного с непосредственным использованием продуктов сгорания для подогрева газа. Рабочие тела разделены, подогрев газа на входе в турбину производится воздухом, забираемым из атмосферы отдельным вентилятором.

В результате рассмотрения тепловых схем турбогенераторов можно сделать следующее заключение:

Турбогенераторы по простой тепловой схеме с расширительной турбиной без подогрева или с электрическим подогревом газа (рисунок 6) позволяют обеспечивать потребителей природным газом с необходимыми пониженными параметрами и вырабатывать электрическую энергию на собственные нужды. Эта тепловая схема может быть реализована в турбогенераторах компрессорных станциях, газораспределительных станциях, газораспределительных пунктах и щитах. Вырабатываемая электрическая энергия не загрязняет окружающую среду и является экологически чистой. Оптимальные условия работы расширительной турбины определяются выбором начального давления газа, получаемого его дросселированием от давления магистрального газопровода (МГ) или газораспределительной станции (ГРС) до давления перед турбогенератором (рисунок 6).

Турбогенераторы, выполненные по другим тепловым схемам (рисунки 7, 8, 9) могут быть успешно применены для вдольтрассовых потребителей магистральных газопроводов газотранспортной системы России.

Определение необходимой температуры подогрева природного газа позволяет, в зависимости от режимных параметров турбогенераторов, обеспечить температуру на выходе из него не ниже температуры точки росы, что существенно повышает эффективность и надежность работы установки. Оценка необходимой мощности подогревателя на входе в расширительную турбину дает возможность позволяющую сформулировать техническое задание на его создание с учётом принятых режимных параметров.

Проведенные исследования по выбору мощностного ряда и обоснованию режимных параметров турбогенераторов электрической энергии для собственных нужд, использующих энергию сжатого природного газа, позволили определить диапазоны режимных параметров турбогенераторов для основных составляющих газотранспортной системы России. Выбор обоснованных диапазонов режимных параметров позволяет унифицировать разрабатываемые турбогенераторы.

В четвёртой главе представлены результаты выбора, обоснования типов и характеристик основных элементов турбогенераторов электрической энергии, использующих энергию сжатого газа для собственных нужд газотранспортной системы.

На рисунке 10 представлена тепловая схема автономного турбогенератора, использующего энергию сжатого природного газа.

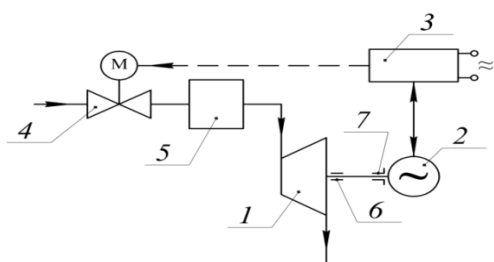


Рисунок 10. Схема автономного турбогенератора, использующего энергию сжатого природного газа

Основные элементы тепловой схемы:

- 1 - расширительная турбина,
- 2 - высокооборотный электрогенератор,
- 3 - преобразователь (блок управления),
- 4 - блок редуцирования,
- 5 - подогреватель газа,
- 6 - опорный подшипник,
- 7 - упорный подшипник.

В настоящем разделе приведен выбор и обоснование типов и характеристик основных элементов автономных турбогенераторов.

На основе выполненного анализа малорасходных турбин для применения в турбогенераторах рассматриваемого класса в качестве расширительных турбин обосновано применение турбин конструкции ЛПИ (рисунок 11) при удовлетворении комплекса пропускной способности A

$= 4 \cdot \frac{\ell_1}{D_{cp}} \cdot \varepsilon \cdot \sin \alpha_1 < 0,02$. При равных значениях пропускной способности турбины

конструкции ЛПИ имеют на (8...15) % КПД выше традиционных парциальных малорасходных

турбин, более технологичны в изготовлении, износостойкие, позволяют срабатывать большие теплоперепады энтальпий.

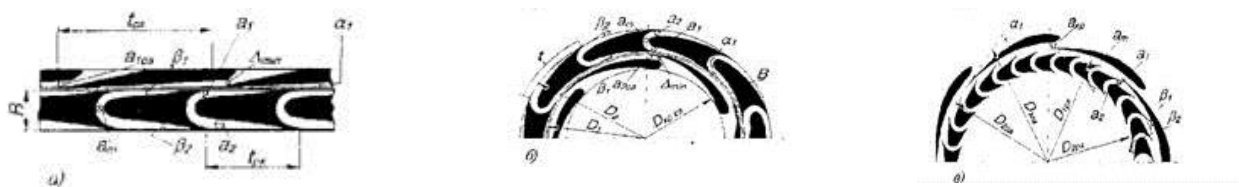


Рисунок 11. Малорасходные турбины конструкции ЛПИ:

t – шаг лопаток; a – диаметры окружностей, вписанных в проходные сечения; D – диаметры проточной части; α, β - углы на входе и выходе направляющих аппаратов и t – шаг лопаток; a – диаметры окружностей, вписанных в проходные сечения; D – диаметры проточной части

Обоснована целесообразность использования газодинамических подшипников для турбогенераторов рассматриваемого класса. Наиболее важным преимуществом газовой смазки является использование малой вязкости газов по сравнению с вязкостью жидкостей. Малая вязкость газов позволяет осуществить высокие скорости вращения при незначительных потерях на трение и малое повышение температуры смазки и опор. Следствием малых потерь на трение является возможность получения малого износа и большой долговечности работы опор, повышенной экономичности турбогенератора при их применении. Кроме достоинств подшипников с газовой смазкой, связанных с перечисленными свойствами газов, их применение может обеспечить дополнительные преимущества по отношению к подшипникам с жидкостной смазкой. Лепестковые газодинамические подшипники, рисунок 12, обладают рядом преимуществ, свойственным подшипникам с газовой смазкой: сохраняют работоспособность в широком диапазоне температур, обеспечивают высокую скорость вращения поддерживаемого вала, 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 газотранспортной системы. Для микротурбогенераторов возможно использование керамических подшипников или подшипников качения с консистентной смазкой.

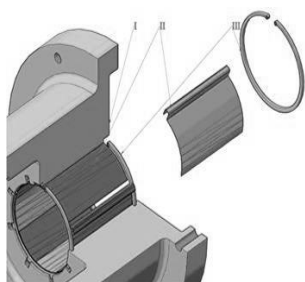


Рисунок 12. Лепестковый опорный газодинамический подшипник:

I- корпус; II- лепестки подшипника;
III-фиксатор подшипника

Обоснован выбор электрических генераторов с постоянными магнитами для турбогенераторов электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа. Электрические генераторы с постоянными магнитами, обладающие достоинствами бесконтактных машин с электромагнитным возбуждением, имеют следующие преимущества: высокая надежность, простота конструкции, высокий КПД, надежное

возбуждение, улучшенные выходные характеристики.

В диапазоне повышенных частот вращения в среднем диапазоне мощности электрические генераторы имеют лучшие массогабаритные характеристики, чем генераторы с электромагнитным возбуждением.

В качестве преобразователя выбран преобразователь с двойным преобразованием энергии, обладающий наиболее совершенной технологией по обеспечению качественной электроэнергии нагрузки.

Пятая глава посвящена разработке новых основных принципов проектирования расширительных турбин унифицированных турбогенераторов электрической энергии, использующих энергию природного газа.

Выполненные в предыдущих разделах анализ режимных параметров, классификация и обоснование структуры типов и характеристик основных элементов турбогенераторов электрической энергии на собственные нужды, использующих энергию сжатого природного газа показал, что рассматриваемые турбогенераторы можно по принципам проектирования расширительных турбин разделить на две группы.

1 группа - турбогенераторы (ТГММ-УСЖГ) - с электрической мощностью до 500 кВт.

2 группа - микротурбогенераторы (МТГ-УСЖГ) с электрической мощностью до 1кВт.

В работе выработаны новые принципы проектирования расширительных турбин унифицированных турбогенераторов и микротурбогенераторов для газотранспортной системы основные из них:

- выбор и обоснование числа ступеней, режимных и геометрических параметров турбогенераторов и микротурбогенераторов с применением программ Турбо-2;
- оптимизация режимных и геометрических параметров турбогенераторов и микротурбогенераторов с помощью программ ONE;
- оригинальное профилирование сопловых каналов и рабочих лопаток расширительной турбины;
- разработка конструктивных схем турбогенераторов и микротурбогенераторов;
- разработка теоретических чертежей сопловых аппаратов и рабочих чертежей;
- разработка 3-D компоновок турбогенератора и микротурбогенератора;

На основе этих новых принципов проектирования могут создаваться унифицированные микротурбогенераторы и турбогенераторы малой мощности, которые могут обеспечить весь мощностной ряд основных потребителей газотранспортной системы России электрической энергии на собственные нужды в соответствии с требованиями нормативных документов ОАО «Газпром».

Реализация разработанных принципов проектирования нового класса турбогенераторов показана на примере турбогенератора электрической энергии малой мощности для собственных нужд газораспределительной станции (первая группа) и

микротурбогенератора для собственных нужд газораспределительного пункта (вторая группа). Отдельные фрагменты реализации приведены ниже.

В качестве исходных данных для разработки расширительной турбины рассматриваемых турбогенераторы были использованы материалы, полученные при анализе электрической мощности на собственные нужды газораспределительных станций и газораспределительных пунктов Северо-Западного региона страны, приведенные в главе 1.

Вариационный предварительный расчёт параметров малорасходной турбины производился с помощью модернизированных программ и методик, разработанных на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ. Целью данного вариационного расчёта является получение областей изменения основных параметров (длина лопатки, средний диаметр рабочего колеса, частота вращения, степень парциальности и т.д.), в пределах которых можно рассчитать и сконструировать данную расширительную турбину при принятых ограничениях: минимальная длина лопатки равна 3 мм; отношение $D_{ср}/\ell_1$ должно быть не менее 8 (исходя из соображений технологичности и простоты конструкции). На основании предварительного выбора геометрических и режимных параметров турбины были сформулированы исходные данные для проведения оптимизационных расчетов турбины по модернизированной программе ONE. Профилирование сопел СА и лопаток РК производилось на основе методики, разработанной на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели», СПбПУ.

Конструктивные схемы турбогенераторов первой и второй группы изображены на рисунках 13 и 14. Конструктивная схема турбогенератора (первая группа) содержит осевую расширительную турбину конструкции ЛПИ, газодинамические опорные и упорный подшипники и высокооборотный синхронный электрогенератор на постоянных магнитах. Такая конструктивная схема может быть реализована в унифицированных турбогенераторах мощностного ряда от нескольких киловатт до 500 кВт, возможно и выше.

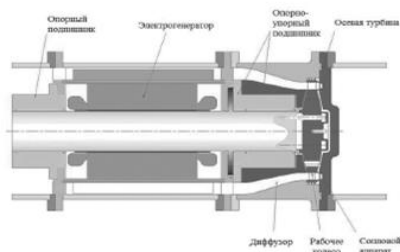


Рисунок 13. Конструктивная схема турбогенератора – первая группа

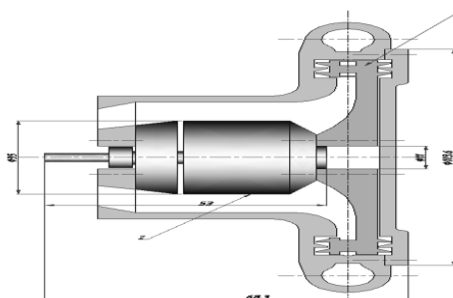


Рисунок 14. Конструктивная схема микротурбогенератора – вторая группа

Конструктивная схема микротурбогенератора (вторая группа) содержит центростремительную расширительную турбину конструкции ЛПИ, газодинамические опорные и упорный подшипники и высокооборотный синхронный электрогенератор на постоянных магнитах. С целью снижения стоимости микротурбогенератора могут быть применены подшипники качения (металлические или керамические) на консистентной смазке. Такая конструктивная схема может быть реализована в унифицированных турбогенераторах мощностного ряда от нескольких ватт до 1 кВт при сравнительно ограниченных ресурсах работы.

Ниже на рисунках 15 и 16 приведены теоретические чертежи СА и РК турбогенератора малой мощности.

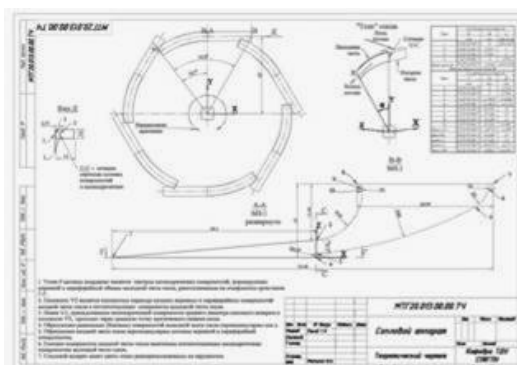


Рисунок 15. Теоретический чертеж соплового аппарата

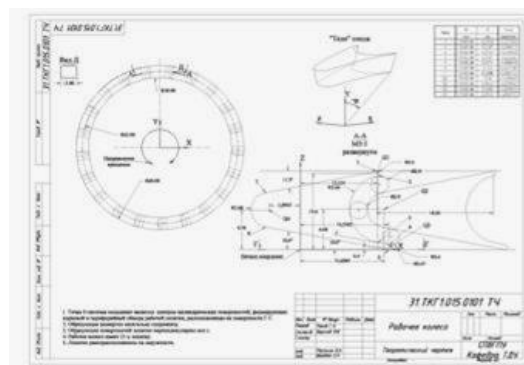


Рисунок 16. Теоретический чертеж рабочего колеса

3-D компоновки турбогенератора малой мощности на газодинамических подшипниках и микротурбогенератора с подшипниками качения с консистентной смазкой приведены на рисунках 17. и 18.

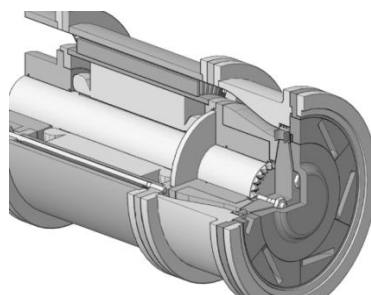


Рисунок.17. Трёхмерная модель турбогенератора малой мощности (МГД-20)



Рисунок 18. Трёхмерная модель микротурбогенератора (МТГ-1) (ООО Газразделение)

Шестая глава посвящена теоретическое исследование физической структуры потока и характеристик расширительной малорасходной турбины конструкции ЛПИ с помощью численных методов. Исследования структуры потока в малорасходной расширительной турбине численными методами позволяет повысить экономичность и надежность МТГ как на номинальном, так и на переменном режимах.

Выполненные теоретические исследования физической структуры потока и характеристик расширительной малорасходной турбины конструкции ЛПИ с помощью

численных методов позволили выработать рекомендации по совершенствованию спроектированных натуральных и модельных расширительных турбин турбогенераторов и повысить их экономичность и надёжность. Использование трехмерных газодинамических расчетов на основе программного комплекса CFX позволило повысить качество проектирования проточных частей (ПЧ) турбинных ступеней.

Решалась стационарная задача. Модель турбулентности SST высокорейнольдсовая, Y^+ от 15. Геометрическая модель и сечение расчетной области приведены на рисунках 19 и 20.

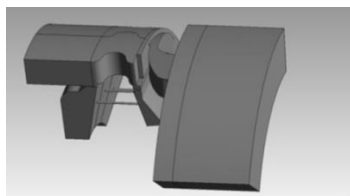


Рисунок 19. Геометрия модели 605

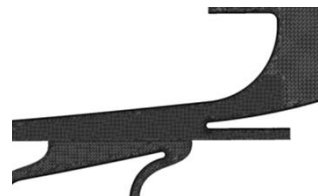


Рисунок 20. Сечение расчетной области

Результаты численных исследований представлены на рисунках 21...27.

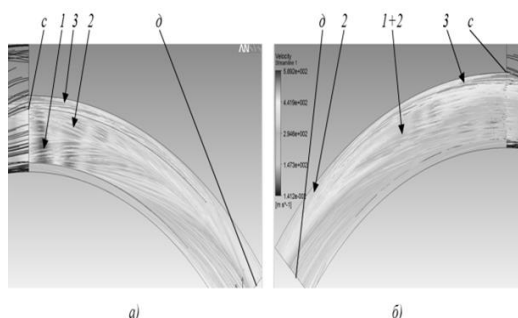


Рисунок 21. Линии тока в косом срезе СА:
а) – вид со стороны входа потока в СА; б) – вид со стороны выхода; с и д – кромки косого среза сопла; 1 – корневой поток сопла; 2 – периферийный; 1+2 – суммарный поток на выходе из СА; 3 – часть потока 2 из предыдущего сопла

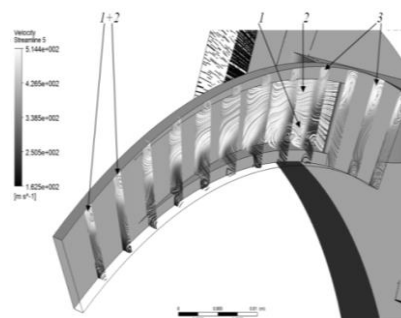


Рисунок 22. Планы тангенциальных скоростей в осевом зазоре ($0.5 \Delta z_{03}$) и КС сопла в пространстве исследуемой модели (шаг планов – 5° , нумерация соответствует рисунку 23)

Картины течения показывают реальность линейчатого течения рабочего тела в пространстве осевого зазора, закономерность которого обоснована выполненными экспериментальными исследованиями. В проточной части ступени наблюдается отклонение пространственных поверхностей тока от линейчатых гиперболоидов в зонах взаимодействия вихревых структур между собой, с вихревыми структурами пассивного газа в корне и ограничивающими поверхностями ступени на периферии и торцом соплового аппарата. Поток 2, в результате отражения от периферии, разделяется на два потока – поток 3, рисунок 23, и поток, суммирующийся в дальнейшем с потоком 1, с образованием потока 4. Поток 4, рисунок 23, отраженный от периферии, частично

входит в РК с периферии радиального зазора, частично – из осевого зазора. Картина течения РТ на входе в РК представлена на рисунке 25.

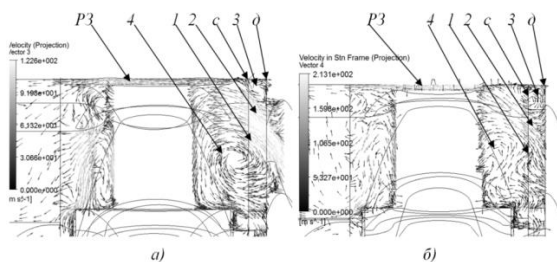


Рисунок 23. Визуализация потока в меридиональных сечениях, расположенных под углами 20° (а) и 35° (б) к кромке сопла, ближайшей к критическому сечению сопла (дуга косога среза сопла $36,7^\circ$); с – середина осевого зазора; д – поверхность КС сопла; нумерация потоков 1...3 соответствует рисункам 20,21 – суммарный отраженный поток; РЗ – радиальный зазор над РК

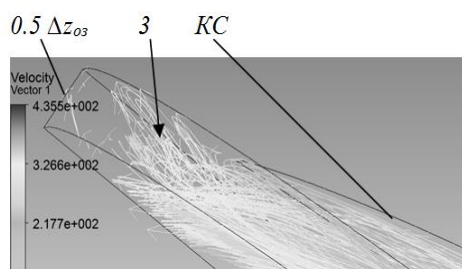


Рисунок 24. Вид на осевой зазор в конце КС сопла, номер потока 3 соответствует рисунку 25

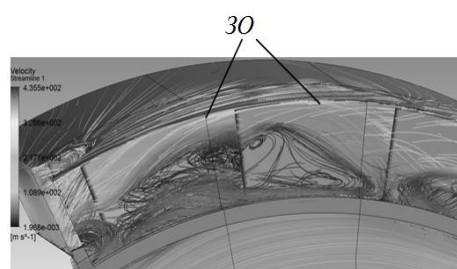


Рисунок 25. Пространственное течение рабочего тела на входе в РК:
30 – зона отражения

На основе созданной модели были проведены исследования влияния конструктивных элементов на эффективность турбины, которые позволили улучшить характер течения в ступени и повысить экономичность турбины.

В седьмой главе приведены результаты экспериментальных и натурных исследований расширительных турбин турбогенераторов и микротурбогенераторов электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа.

Широкое внедрение турбоустановок в качестве автономных источников требует широких всесторонних теоретических и экспериментальных исследований характеристик модельных и натурных расширительных турбин турбогенераторов. Для выполнения таких исследований необходимо было создание мощной материально-технической исследовательской базы, включающей новые и модернизированные стенды, экспериментальные модельные и экспериментальные установки (рисунки 26...29), объекты исследования, производственное и технологическое оборудование, вычислительные и программные комплексы. Надо было разработать комплекс методик проведения и обработки экспериментальных и натурных данных, позволяющих получить основные достоверные характеристики расширительных турбин и других элементов турбогенераторов, не опубликованных в литературе.

Эти характеристики должны были подтвердить правомочность и достоверность разработанных в диссертационной работе принципов проектирования расширительных

турбин для нового класса турбогенераторов электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа.

Экспериментальные установки

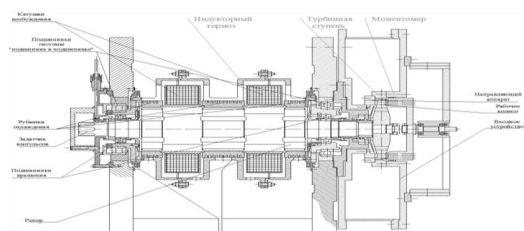


Рисунок 26. Продольный разрез экспериментальной высокооборотной установки ЭУ-110М

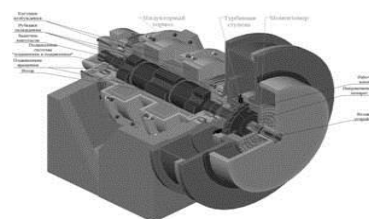


Рисунок 27. 3-D модель экспериментальной установки ЭУ-110М

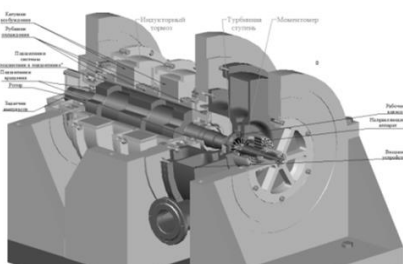


Рисунок 28. 3-D модель экспериментальной установки ЭУ-110МЦс



Рисунок 29. Внешний вид экспериментальной установки ЭУ-110М

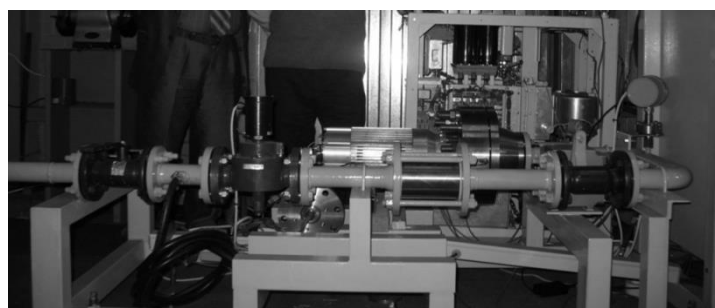


Рисунок 30. Экспериментальная установка МТГ-МДГ-20

Объекты исследования



Рисунок 31. Рабочее колесо расширительной турбины ТГ малой мощности



Рисунок 32. Сопловой аппарат расширительной турбины ТГ малой мощности

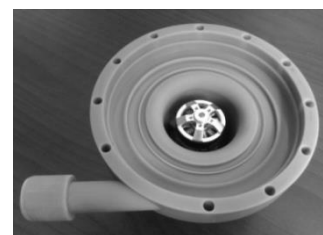
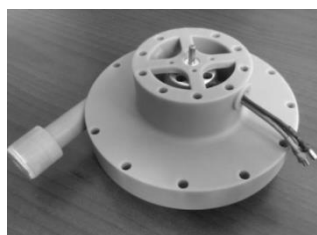


Рисунок 33. Детали микротурбогенератора (МТГ-1) «Газпром газораспределение»

Экспериментально на ЭУ-110М исследованы модельные расширительные турбины конструкции ЛПИ (рисунки 31 и 32) для применения их в турбогенераторах малой мощности на следующие модельные параметры $p_0=0,247$ МПа, $T_0=320$ К, $n=26100$ об/мин, $G=0,067$ кг/с. Уровень КПД в варианте МРТ с РК без бандажа составил 59% при $u/C_0=0,45$, а с РК с бандажом 67.5% при $u/C_0=0,455$.

Создана испытательная база на ГРС «Сертолово» для проведения промышленного эксперимента, работающей в штатных режимах эксплуатации, при подаче на МДГ-20 части расхода газа ГРС, до 1700 $\text{нм}^3/\text{час}$.

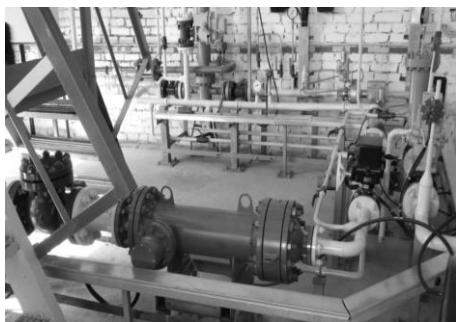


Рисунок 34. Натурный стенд для проведения испытаний МДГ-20 на ГРС «Сертолово»



Рисунок 35. Внешний вид высокооборотного турбогенератора МДГ-20

На ГРС «Сертолово» (рисунок 34) была выполнена серия промышленных экспериментов, показавшая работоспособность как установки в целом, так и системы охлаждения электрогенератора МДГ-20 (рисунок 35). Электрический КПД МДГ-20 при применении турбинной ступени без бандажа составил 26%, а для ступени с бандажом до 37,5%. Сопоставление экспериментальных и натуральных исследований подтвердили заключение о низком электрическом КПД электрогенератора (0,54...0,58).

Комплекс проведенных экспериментальных и натуральных 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. Ниже представлены (рисунки 36, 37, 38) результаты расчётно-экспериментальных и натуральных исследований расширительной турбины турбогенератора МДГ-20 на ГРС «Сертолово».

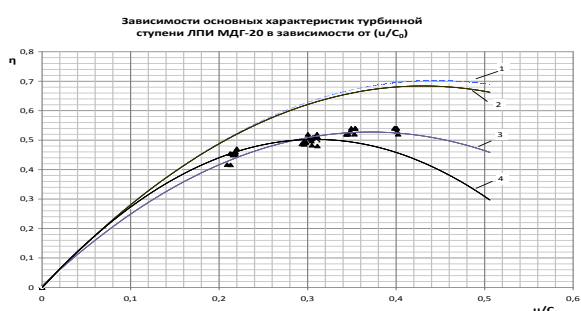


Рисунок 36. Зависимости основных характеристик турбинной ступени ЛПИ МДГ-20 в зависимости от (u/C_0)

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

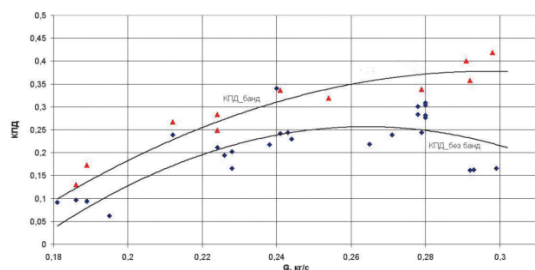


Рисунок 37. График зависимости электрического КПД МДГ-20 от расхода газа

На экспериментальной установке МТТ-МДГ-20 (рисунок 30) выполнен комплекс исследований рабочих характеристик турбогенератора малой мощности МДГ-20 в зависимости от числа дренажных отверстий и от нагрузки на ротор при разных режимах работы турбогенератора.

Выполнено исследование натуральных микротурбогенераторов (рисунок 33) на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ для их исследования на воздухе на стендах и установках СПБПУ и получены их характеристики, подтверждающие хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных (рисунки 39,40).

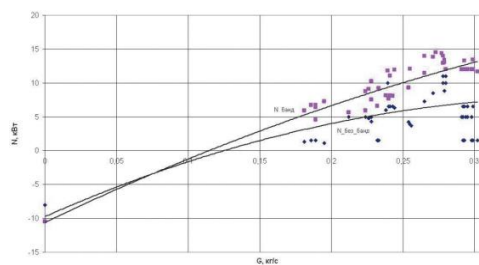


Рисунок 38. График зависимости электрической мощности МДГ-20 от расхода газа

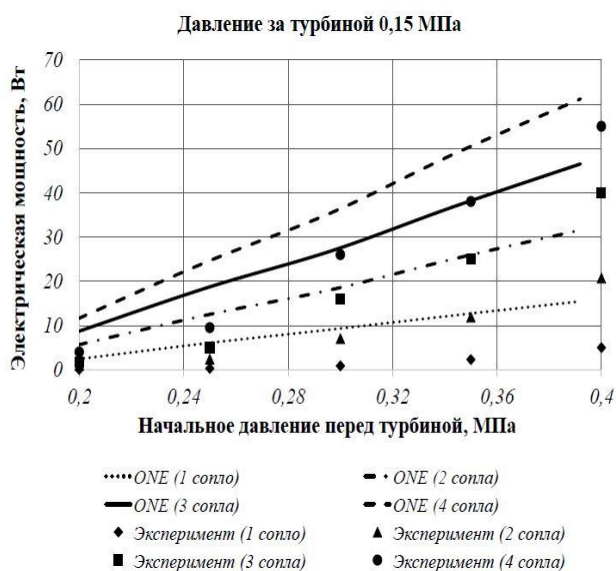


Рисунок 39. График зависимости мощности микротурбогенератора от начального давления. Сравнение с расчётными данными

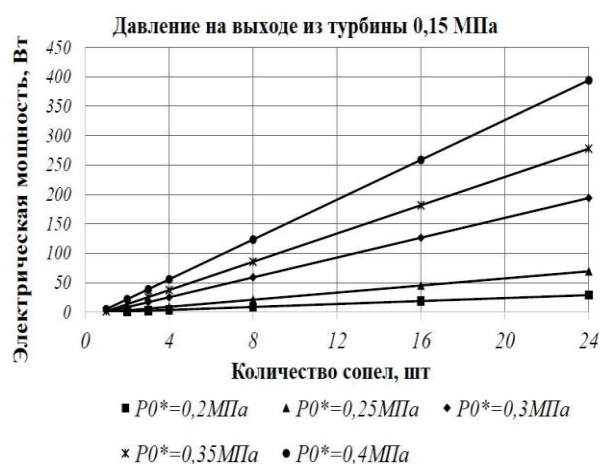


Рисунок 40. Зависимость мощности турбогенератора микротурбогенератора от числа сопел

В восьмой главе показана практическая реализация турбогенератора малой мощности МДГ-20 в составе изделия БК АЭИ МДГ-20 при блочном исполнении.

В состав изделия – БК АЭИ МДГ-20 (рисунок 41) входят:

- входной узел подготовки технологического газа;
- выходной узел редуцирования технологического газа;
- турбогенератор электрической мощностью 20 кВт (МДГ-20) (рисунок 35);
- блок управления БК АЭИ МДГ-20 электрической мощностью 20 кВт (БУ);
- автономная система пожарной сигнализации;

- система подогрева входящего газа;
- система автономного контроля загазованности;
- система вентиляции и отопления.

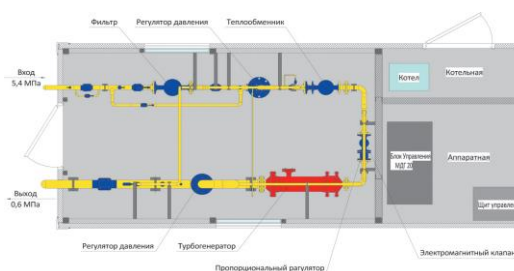


Рисунок 41. Компоновка оборудования
БК АЭИ МДГ-20

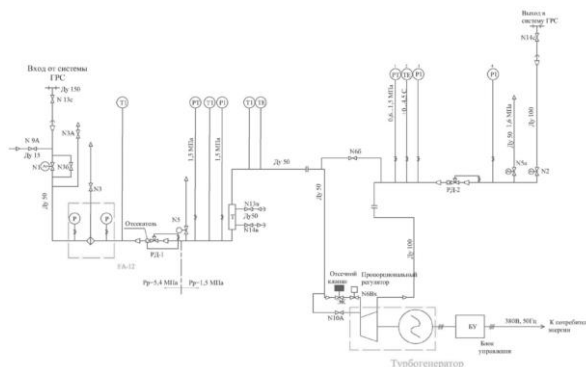


Рисунок 42. Технологическая схема
БК АЭИ МДГ-20

Степень автоматизации оборудования БК АЭИ МДГ-20 (рисунок 42) обеспечивает работу на всех рабочих режимах без непрерывного обслуживания, а также функционирование в составе комплексной системы автоматизации на ГРС.

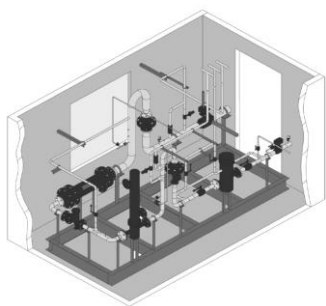


Рисунок 43.
Технологический отсек

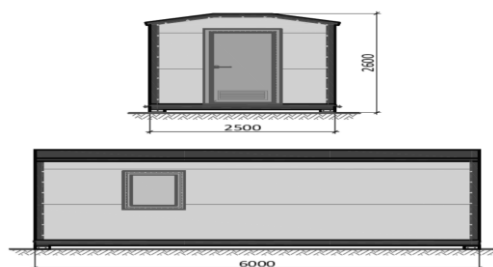


Рисунок 44. Габаритные размеры
БК АЭИ МДГ-20



Рисунок 45. Внешний вид
БК АЭИ МДГ-20

Изделие БК АЭИ МДГ-20 (Рисунок 43, 44, 45) предназначено для выработки электрической энергии на собственные нужды мощностью 20 кВт напряжением 380 В/220В переменного тока частотой 50 Гц при установке его на газораспределительных станциях.

Основные технические данные БК АЭИ МДГ-20 (рисунок 44)

Таблица 5

Входные параметры	Значение
Рабочее тело	Природный газ ГОСТ 5542-87, ГОСТ 21199-82 р.5
Давление газа в трубопроводе, МПа	не более 1,5
Фланцевое соединение, мм	Ду50
Чистота газа, мкм	не более 10
Выходные параметры	
Давление газа в трубопроводе, МПа	не более 0,5
Фланцевое соединение, мм	Ду100
Номинальная электрическая мощность, кВт	20

Номинальное выходное напряжение (линейное), В	380
Номинальное выходное напряжение (фазное), В	20
Число фаз	3+PE
Частота, Гц	50
Коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения, %	не более 12
Общие параметры	
Установка экологически чистая	ГОСТ 121.005-88
Уровень шума в пределах нормы	ГОСТ 121.003-83
Сейсмическое воздействие по шкале MSK-64	не менее 7 баллов

Изделие БК АЭИ МДГ-20 предназначено для выработки электрической энергии на собственные нужды мощностью 20 кВт напряжением 380 В/220В переменного тока частотой 50 Гц при установке его на газораспределительных станциях.

Заключение

1. Разработан и обоснован новый класс автономных турбинных источников электрической энергии (турбогенераторов), использующих энергию сжатого природного газа для газотранспортной системы России. Электрическая мощность предложенных турбогенераторов, обеспечивающих собственные нужды линейных магистральных газопроводов, газоперекачивающих станций, газораспределительных станций, газораспределительных пунктов и щитов лежит в диапазоне от нескольких десятков ватт до 500...550 кВт.

2. Выполненные исследования показали, что наиболее полно сформированным требованиям к автономным источникам электрической энергии для газотранспортной системы России удовлетворяют турбодетандерные электрогенераторы, в дальнейшем турбогенераторы. Они утилизируют собственные энергетические ресурсы газотранспортной системы, просты и надёжны в эксплуатации, производят экологически чистую электроэнергию.

4. Предложены основные технические решения, основанные на комплексе современных экспериментальных и натуральных исследований, теоретических методов одномерного и трёхмерного расчёта основных узлов турбогенераторов с использованием конструкторско-технологических решений. К таким решениям относятся применение малорасходных высокоэффективных расширительных турбин с внутренним КПД по полным параметрам не менее 70...75%, газодинамических подшипников и высокооборотных электрогенераторов с частотой вращения ротора до 60000 об/мин с преобразователями частоты 50 Гц и напряжением 220/380вт.

5. Выбран и обоснован мощностной ряд основных потребителей электрической энергии на собственные нужды газотранспортной системы России:

- линейные вдольтрассовые потребители

- магистральных газопроводов – 0,5...16 кВт/ед;
- компрессорные станции – 350...600 кВт/ед;
- газораспределительные станции – 2...20 кВт/ед;
- газораспределительные пункты и щиты – 0.3...1.0 кВт/ед.

Проведенные исследования по выбору мощностного ряда и обоснованию режимных параметров турбогенераторов электрической энергии для собственных нужд, использующих энергию сжатого природного газа, позволили определить диапазоны режимных параметров турбогенераторов для основных составляющих газотранспортной системы России. Выбор обоснованных диапазонов режимных параметров позволил унифицировать разрабатываемые турбогенераторы.

6. Выполненный анализ тепловых схем турбогенераторов электрической энергии, тепловые схемы для различных потребителей электрической энергии: магистральных газопроводов, газоперекачивающих станций, газораспределительных станций, газораспределительных пунктов и щитов.

7. Выработаны основные принципы проектирования расширительных турбин турбогенераторов и микротурбогенераторов для газотранспортной системы России.

8. Выполненное теоретическое исследование физической структуры потока и характеристик расширительной малорасходной турбины конструкции ЛПИ с помощью численных методов позволили выработать рекомендации по совершенствованию спроектированных натуральных и модельных расширительных турбин турбогенераторов и повысить их экономичность и надёжность. Использование трехмерных газодинамических расчетов на основе программного комплекса CFX позволяет повысить качество проектирования проточных частей (ПЧ) турбинных ступеней.

9. Разработаны и созданы модельные и натурные расширительные турбины для проведения исследований в модельных и натуральных условиях.

10. Исследованы модельные расширительные турбины конструкции ЛПИ для применения их в турбогенераторах малой мощности и в микротурбогенераторах.

11. 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 $\text{м}^3/\text{час}$.

12. 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%. Сопоставление экспериментальных и натуральных исследований подтвердили заключение о низком электрическом КПД электрогенератора (0.54...0.58).

13. Комплекс проведенных экспериментальных и натурных исследований позволил провести сравнение полученных натурных характеристик с расчётными данными на натурных параметрах, показать их удовлетворительную сходимость и разработать рекомендации на их совершенствование.

14. Накоплен уникальный опыт технологического освоения производства турбогенераторов малой мощности и микротурбогенераторов в условиях использования современного машиностроительного комплекса по таким технологическим операциям как изготовление расширительных турбин, газодинамических подшипников, высокооборотных электрогенераторов и других изделий.

Перечень основных публикаций автора по теме диссертации

1. Фокин Г.А. Автономные источники электрической и тепловой энергии для магистральных газопроводов и газораспределительных станций/Г.А.Фокин// Монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 164 с.
2. Фокин Г.А. Применение автономных химических и нетрадиционных источников для энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций /Г.А. Фокин// Научно-технические ведомости СПбГПУ. -2009. Т. 1.- № 89.- С. 131-141.
3. Фокин. Г.А. Автономный энергоисточник на базе микротурбодетандерного генератора электрической мощностью 20кВт для электроснабжения ГРС и ГРП (БК АЭИ МДГ-20) /Г.А. Фокин, С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин// Энциклопедия. Машиностроение М.- 2015. - том IV. - раздел IV-19 расчет и конструирование машин. Турбинные установки. - С. 344 - 349.
4. Фокин Г.А. Проблемы энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций. Часть 1/ Г. А. Фокин// Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2009. №4 – С.121 - 131.
5. Фокин Г.А, XXV мировой газовый конгресс " Газ: основа будущего глобального роста", "Новый подход к решению вопроса повышения энергоэффективности работы крупной газотранспортной системы". г. Куала-Лумпур, Малайзия, 4...8 июня 2012.
6. Фокин Г.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей автономных энергетических установок малой мощности для энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций/ Г.А. Фокин // Теплоэнергетика. -2010. - № 11. - С. 65 - 69.
7. Фокин Г.А. 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 //Наука и техника в газовой промышленности. 2010.- №4.- С.96 - 103.
8. Фокин Г.А. Парогазовая установка компрессорной станции «Северная» / Н.А. Забелин, А.В. Лыков, В.А. Рассохин, В.Н. Сивоконь, Г.А. Фокин// Наука и техника в газовой промышленности. 2013. - № 4 (56). - С. 93-103.
 9. Фокин Г.А. Подшипники для малорасходных турбин автономных источников электрической энергии/Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев, Г.А. Фокин// Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2014. - № 4 (207). - С. 210-223.
 10. Фокин Г.А. Влияние уплотнений на эффективность малорасходных турбинных ступеней конструкции ЛПИ/Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, А.А. Себелев, Г.А. Фокин, И.С. Харисов// Научно-технические ведомости СПбГПУ.- 2013. - № 3 (178). - С. 32-42.
 - 11.Фокин Г.А. Вероятностный анализ безопасности транспортно-технологического оборудования/В.И. Гуменюк, А.А. Сыров, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин//Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009.- №78. - С. 98-102.
 - 12.Фокин Г.А. Экспериментальный стенд и методика исследования турбомашин газотурбинных установок малой мощности /Г.А. Фокин, С.Н. Беседин, В.А. Рассохин, Г.Л. Раков// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2010. - Т. 12. - № 1...2. - С. 284-289.
 13. Фокин Г.А. Малорасходная турбина в установках для автономного энергоснабжения газораспределительных пунктов/Н.А. Забелин, Д.А. Котлов, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин// Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2014. - № 4 (207). - С. 40-49.
 - 14.Фокин Г.А. Применение малорасходных турбин конструкции ЛПИ в автономных источниках электрической энергии для газораспределительных станций магистральных газопроводов/Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин, Ю.В. Матвеев// Энергетик. 2015.- № 9.- С.50-57.
 - 15.Фокин Г.А. Натурные испытания микротурбодетандерного генератора МДГ-20/С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин//Наука и техника в газовой промышленности. 2015.- № 2.- С.74-79.
 - 16.Фокин Г.А. Разработка конструктивного облика турбогенератора МДГ-20 в составе изделия БК АЭИ МДГ-20 в блочном исполнении/С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин//Наука и техника в газовой промышленности. 2015.- №2.- С.74-88.
 - 17.Фокин Г.А. Повышение эффективности газораспределительных систем за счет применения автономных источников электроснабжения на базе микротурбодетандерных генераторов малой мощности/ С.Н. Беседин, Н.А.Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин// Сборник трудов XXII Международного конгресса. Том XXII, CITOGIC. - 2014, Калининград, 24...27 сентября 2014. - С. 319-327.