

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely 'СМ' followed by a surname, with a long horizontal flourish underneath.

Смирнов Максим Викторович

БЕЗЛОПАТОЧНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СТУПЕНИ ДЛЯ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Специальность – 05.04.12 Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Фокин Георгий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Кузнецов Юрий Павлович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород, кафедра «Энергетические
установки и двигатели», профессор

Лыков Алексей Викторович
кандидат технических наук,
ПАО «Силовые машины – ЗЛТ, ЛМЗ, Электросила,
Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург, СКБ
«Турбина», ЛМЗ, инженер-конструктор 1 категории

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-
производственное объединение по исследованию и
проектированию энергетического оборудования им.
И.И.Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»),
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «19» марта 2019г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

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

Автореферат разослан « » 201 г.

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



Талалов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Рост потребления газа ставит проблему развития и увеличения эффективности газотранспортной системы, в том числе, за счет использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). В России транспорт газа от месторождений конечному потребителю осуществляется преимущественно посредством трубопроводной газотранспортной системы. Протяженность газотранспортной системы России составляет 171,2 тыс. км, на ней функционирует 250 газокompрессорных станций, суммарная установленная мощность агрегатов газотранспортной системы составляет 46,2 тыс. МВт. При транспорте газа трубопроводной системой на компрессорных станциях (КС) газ сжимается до высоких давлений (5,4...10 МПа) для уменьшения удельного объема газа и, таким образом, потерь трения и затрат на транспорт. На сжатие газа расходуется значительная энергия. При удаленном транспорте газа, например от месторождений Ямала до потребителей в Западной Европе, до 6...7% транспортируемого газа расходуется на работу газоперекачивающих агрегатов. Конечные потребители используют газ давлений 0,11...3,0 МПа. Давление газа снижается последовательно на объектах газораспределительной системы – газораспределительных станциях, газораспределительных пунктах и газораспределительных щитах. В настоящее время технологический процесс построен на последовательном дросселировании газа на объектах газораспределительной системы от давления в магистральном газопроводе до давления конечного потребителя. При этом, полезная работа не производится, таким образом, потенциальная энергия газа высокого давления безвозвратно утрачивается. Альтернативой является технологический процесс с выработкой электрической энергии за счет потенциальной энергии сжатого газа. При этом часть энергии, затраченной на сжатие газа на КС, можно полезно использовать, превратив в электрическую энергию с помощью детандер-генераторных агрегатов (ДГА). Процесс утилизации энергии, затраченной газоперекачивающими агрегатами на процесс транспортировки чрезвычайно важен для повышения эффективности всей газотранспортной системы.

В настоящее время ДГА не получили широкого распространения на объектах газотранспортной системы. Если в диапазоне больших мощностей (от 1 МВт и более) имеется некоторое количество реализованных в мире проектов, и несколько реализовано также в России, то в диапазоне малых мощностей количество реализованных проектов исчисляется единицами. При создании ДГА малых мощностей имеют место

объективные технические и экономические сложности, связанные со сложностью создания и доводки высокооборотных установок, дороговизной изготовления лопаточных турбин, а также высокой эрозионной активностью рабочего тела. Указанные обстоятельства определяют высокую стоимость агрегатов, что находит отражение в долгих сроках их окупаемости.

Существенно снизить стоимость установок ДГА малой мощности и повысить их эксплуатационные характеристики могло бы применение безлопаточных турбомашин. Безлопаточные турбины существенно менее требовательны к качеству рабочего тела, обладают повышенной эрозионной стойкостью, практически не имеют в проточной части малых зазоров и сложных уплотнений. Их технологическая простота определяет низкую стоимость и производственную доступность.

В настоящее время существуют ДГА со струйно-реактивными турбинами, конструктивно простыми и обладающими хорошими эксплуатационными характеристиками. В то же время внутренний КПД струйно-реактивных турбин не превышает 29%. Представляется целесообразным развитие направления безлопаточных турбомашин для ДГА, эксплуатационно пригодных для объектов газотранспортной системы и обладающих, при этом, большей эффективностью.

Цели и задачи

Целью настоящей работы является разработка подхода к проектированию эффективных безлопаточных турбин, их исследование и совершенствование для улучшения технико-экономических показателей детандер-генераторных агрегатов малой мощности.

Задачи исследования:

- 1) Определение конструктивного облика ДГА и типа применяемой безлопаточной турбины, отвечающих предъявляемым к этим установкам требованиям.
- 2) Разработка одномерной и трехмерной методик расчета безлопаточной турбины ДГА с учетом специфики рабочего процесса, валидация разработанных методик.
- 3) Анализ баланса потерь в исследуемой безлопаточной турбине, выявление резервов повышения эффективности.
- 4) Разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию безлопаточных турбин ДГА.

Научная новизна

Научная новизна работы выражается в следующем:

- 1) Впервые систематизирована информация по потенциалу генерации электрической энергии на ДГА в газотранспортных системах разных стран. Обоснована актуальность применения ДГА малой мощности. Систематизированы современные решения по интеграции ДГА в системы с возобновляемыми источниками энергии для организации подогрева газа.
- 2) Предложена безлопаточная центробежно-реактивная турбина, превосходящая по эффективности все известные на текущий момент типы безлопаточных турбин при их применении в ДГА, и обладающая приемлемыми эксплуатационными характеристиками.
- 3) Разработаны и валидированы одномерная и трехмерная расчетные модели центробежно-реактивной турбины с учетом термодинамических параметров реального газа.
- 4) Впервые проведена апробация использования центробежно-реактивной турбины в составе ДГА путем численного эксперимента.
- 5) Предложены и обоснованы мероприятия по совершенствованию центробежно-реактивных турбин в составе ДГА, направленные на повышение эффективности.

Теоретическая и практическая ценность работы

Работа вносит существенный вклад в систематизацию информации по перспективности применения ДГА малой мощности в газотранспортных системах. Разработаны инженерные методики выбора геометрических и режимных параметров ЦБРТ для ДГА, одномерная математическая модель ЦБРТ с учетом термодинамических свойств реального газа.

Предложенный математический аппарат может применяться при создании турбомашин для ДГА мощностью до 500 кВт.

Методы исследований

Работа проводилась с использованием методов математического моделирования (одномерный расчет) и численно-экспериментальных (вычислительная газодинамика) методов.

Газодинамические расчеты диссертационного исследования были реализованы на мощностях Суперкомпьютерного центра «Политехнический».

Личный вклад автора состоит в:

- 1) Проведении обзора и систематизации информации по потенциалу генерации электрической энергии на ДГА и по целесообразным источникам подогрева газа для ДГА малой мощности.
- 2) Обосновании предпочтительного конструктивного облика ДГА и типа применяемой турбины.
- 3) Создании и валидации одномерной и трехмерной моделей расчета турбины ДГА.
- 4) Проведении апробации предложенной безлопаточной турбины в ДГА путем проведения численного эксперимента. Разработки и обоснования мероприятий по дальнейшему совершенствованию исследованной расширительной машины.

Защищаемые положения

Автор защищает:

- 1) Разработанную одномерную модель безлопаточной центробежно-реактивной турбины с интеграцией термодинамических свойств реального газа.
- 2) Методику проведения численного моделирования исследуемого объекта.
- 3) Результаты численной апробации применения центробежно-реактивной турбины в составе ДГА.
- 4) Разработанные предложения по дальнейшему совершенствованию безлопаточных центробежно-реактивных турбин.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена использованием в процессе выполнения работы апробированного методологического обеспечения численного эксперимента, показавшего удовлетворительную сходимость с

результатами физических экспериментов на модельном варианте центробежно-реактивной турбины. Выносимые на защиту положения диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ и индексируемых в SCOPUS, доложены на отечественных и международных конференциях.

Апробация результатов работы

Результаты работы были представлены и обсуждались на:

- 1) Международная отраслевая конференция «ANSYS в энергетике», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 11 – 12 апреля 2012г., тема доклада: «Опыт численного моделирования течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ».
- 2) ХLI Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 3 – 8 декабря 2012г., тема доклада: «Влияние формы горла малорасходного соплового аппарата на его эффективность».
- 3) ХLIII Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 1 – 6 декабря 2014г., тема доклада: «Особенности сравнения физического и численного экспериментов».
- 4) Результаты работы включены в отчет по Федеральной Целевой Программе по теме «Разработка и создание турбогенераторных установок электрической мощностью 1 и 30 кВт, использующих энергию сжатого природного газа газотранспортной системы России», соглашение о предоставлении субсидии от 27.10.2015г. №14.578.21.0127.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает раздел введения, 4 главы, заключение, перечень принятых обозначений и сокращений, а также список литературы. Текст диссертации изложен на 161 странице, содержит 75 рисунков, 15 таблиц, список использованных литературных источников, включающий 111 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая ценность.

В первой главе обоснована актуальность применения ДГА малой мощности, а также установлены основные проблемы, препятствующих активному развитию рынка ДГА и их повсеместному внедрению на объектах газотранспортной системы и в технологических процессах.

Для обоснования актуальности использования ДГА малой мощности выполнена оценка мирового потенциала утилизации давления газа на объектах газотранспортных систем. Кроме суммарного потенциала газотранспортных систем в разных странах, также определено типичное распределение потенциалов генерируемой мощности по газораспределительным станциям, характерное для всех систем газораспределения. Показано, что установки ДГА малой мощности (до 100 кВт) являются востребованными, что обусловлено балансом потенциала выработки и потребления электрической энергии на объектах газотранспортной системы.

Выделены несколько основных факторов, ограничивающих процесс дальнейшего развития и повсеместного внедрения ДГА:

1. Высокая стоимость установок ДГА, длительные периоды окупаемости, техническая сложность установок, необходимость разработки индивидуальных технических решений.
2. Низкие температуры на выходе из ДГА, необходимость источника теплоты для подогрева газа или установки, использующей холод после ДГА.
3. Существенное изменение параметров газа (давления и, в особенности, расхода) в течение года на газораспределительных станциях (ГРС), что определяет переменные режимы работы как основные для ДГА.
4. Широкий диапазон параметров газа на входе/выходе объектов газотранспортной системы, сложности в создании унифицированного мощностного ряда установок.
5. Высокая загрязненность и эрозионная активность рабочего тела.

В главе рассмотрены различные схемные решения с интеграцией ДГА малой мощности в системы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Это позволяет достигать эффективного электрического КПД до 75% и выше без производства дополнительного сжигания топлива.

На основе вышеприведенных ограничивающих факторов определен предпочтительный конструктивный облик ДГА и показано, что безлопаточные турбины

удовлетворяют условиям технологической простоты и имеют качественные эксплуатационные характеристики.

Анализ различных типов безлопаточных турбин, рисунок 1, показал, что центробежно-реактивные турбины (ЦБРТ) представляются на текущий момент самыми эффективными из безлопаточных со значением внутреннего КПД более 42%.

Полученный вывод обосновывает выбор ЦБРТ как объекта дальнейшего изучения и необходимость его апробации в составе ДГА путем численного моделирования.

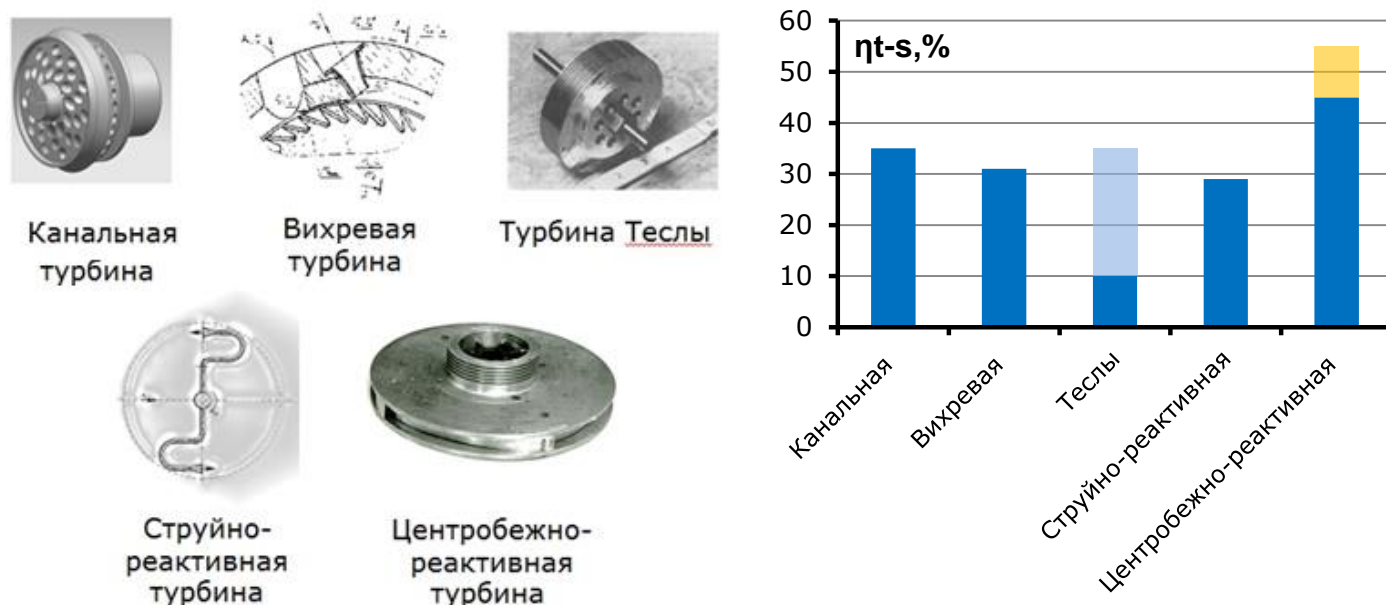


Рисунок 1 – Типы безлопаточных турбин и уровень их эффективности

Как следует из определения ЦБРТ, сопловой аппарат в таких турбинах отсутствует, а полное срабатывание перепада происходит в рабочем колесе. Конструктивно ЦБРТ представляет собой рабочее колесо, установленное на валу консольно, рисунок 2. Рабочее тело подводится к центру колеса со стороны, противоположной валу, и далее поворачивает от осевого к радиальному направлению, разделяясь по каналам. Двигаясь по криволинейным каналам, рабочее тело достигает периферии колеса, где расположено критическое сечение. За ним поток разгоняется до сверхзвуковых

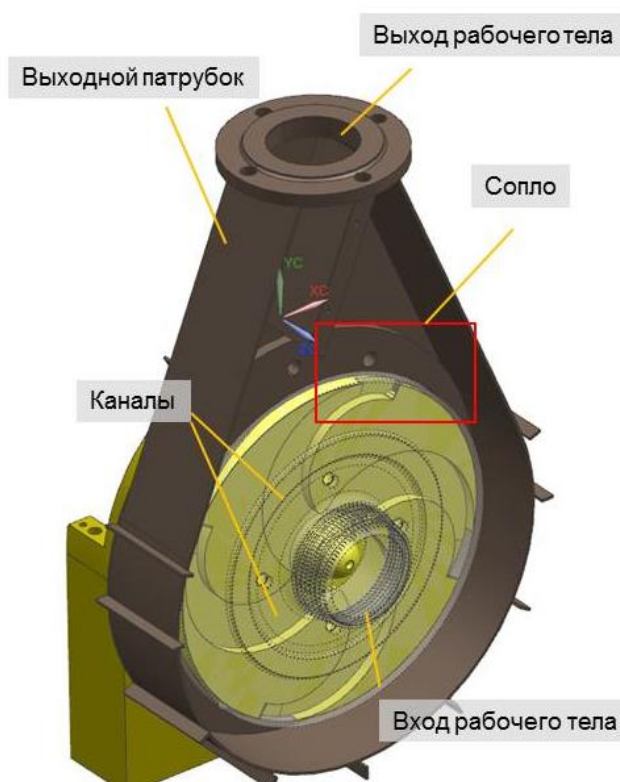


Рисунок 2 – Общий вид ЦБРТ

скоростей в организованном расширяющемся сопле либо в косом срезе. Выход рабочего тела может быть организован в радиальном или осевом направлении. За рабочим колесом может следовать выходной патрубков или диффузор.

Вторая глава посвящена разработке методик расчетного исследования ЦБРТ.

Описана методика предварительного определения геометрических и режимных параметров установки. Определен подход к разработке одномерной модели ЦБРТ, особое внимание уделено вопросу расчета термодинамических параметров рабочего тела. Показано, что в общем случае для ДГА, ввиду близости параметров рабочего тела на входе к критической точке, необходимо применение моделей реального газа даже в рамках инженерных расчетов.

Произведена разработка методики численного моделирования и ее валидация на основе экспериментального исследования модельной ступени ЦБРТ, рисунок 3. Обоснована необходимость расчета полной окружности и совместного моделирования рабочего колеса и выходного устройства. Высокие потери от нестационарности и связанные с этим неточности стационарных расчетов показали необходимость использования нестационарного подхода. Показано, что при расчете ЦБРТ со степенью понижения давления $\pi_T < 5$ трехмерный нестационарный расчет демонстрирует завышение значения внутреннего КПД не более чем на 2,2%, рисунок 4 .

Подход к моделированию турбулентности	RANS, SST
Временная дискретизация	Нестационарный расчет
Совместное моделирование	Да, турбины и выходного устройства
Угловой сектор модели	Полная задача 360°
Параметры турбулентности на входе	Степень турбулентности 5%
Моделирование ламинарно-турбулентного перехода	При наличии параметров турбулентности на входе
Параметры шероховатости	Предположение гладких стенок

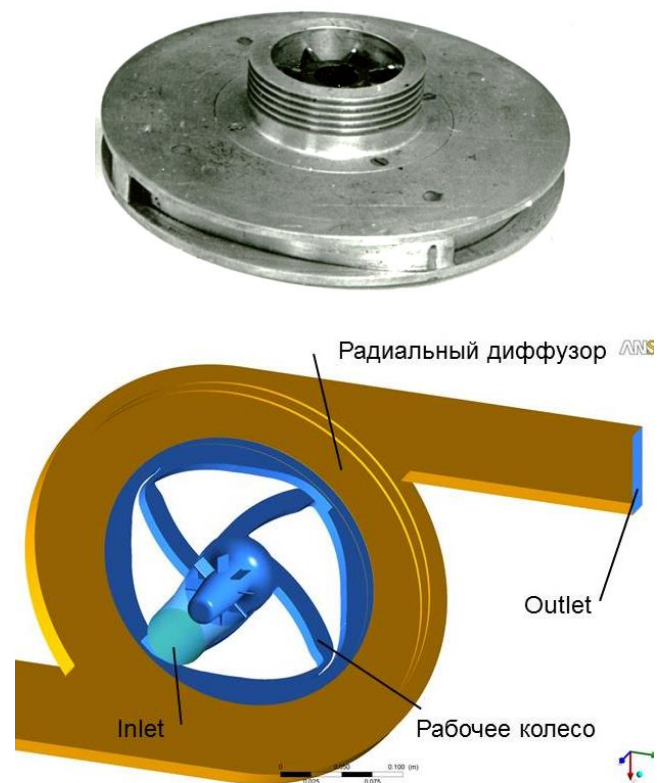


Рисунок 3 – Модельная ЦБРТ: общий вид и расчетная модель

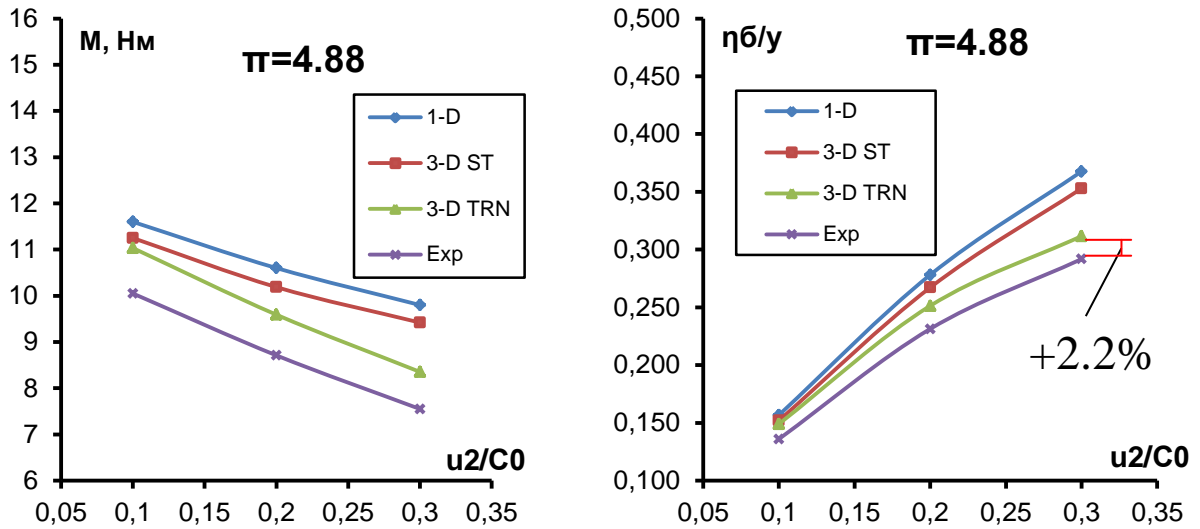


Рисунок 4 – Расход и момент на рабочем колесе ЦБРТ

В третьей главе описана численная апробация использования ЦБРТ в составе ДГА. Получены характеристики ЦБРТ и описаны их характерные особенности. Обоснована нелинейность моментной характеристики в зависимости от u_2/C_0 , обусловленная ростом расхода рабочего тела с частотой вращения ввиду проявления компрессорного эффекта. Для натурной ЦБРТ получен внутренний КПД 49% при оптимальном характеристическом числе $u_2/C_0=0,6$.

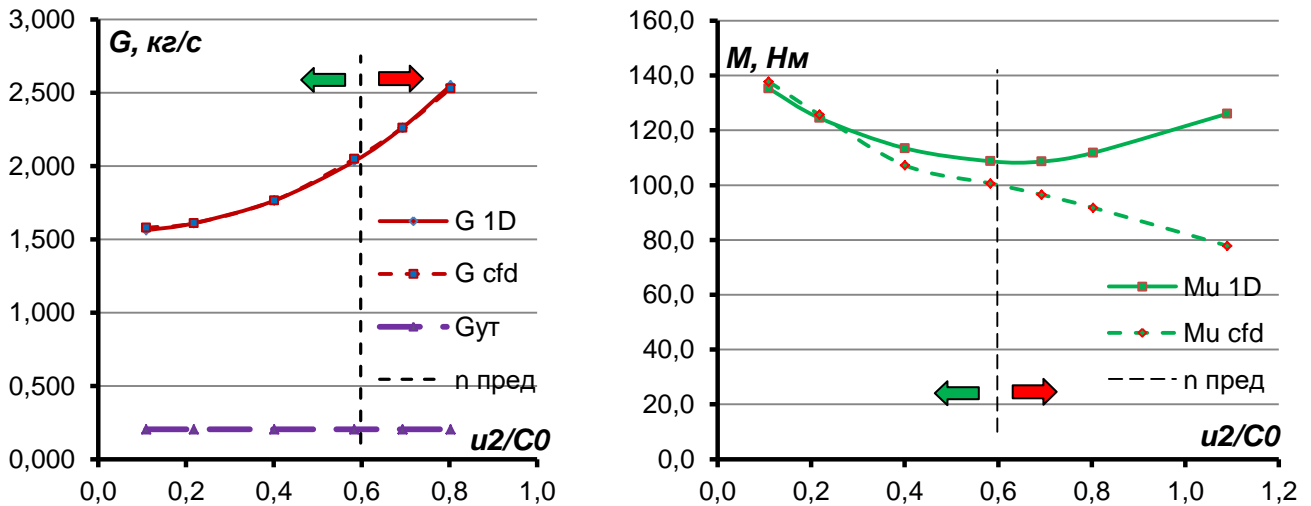


Рисунок 5 – Расход и момент на рабочем колесе ЦБРТ

Для выбора направлений совершенствования ЦБРТ проведен анализ основных источников потерь и построена диаграмма потерь и эффективности, рисунок 6. Диаграмма получена по результатам одномерного расчета путем оценки потери располагаемой мощности от действия каждого источника потерь и приведения полученных значений к безразмерному виду. Тогда каждому источнику потерь будет соответствовать коэффициент потерь ζ , а внутренней мощности – внутренняя

эффективность η_{t-s} . Для увеличения достоверности, в одномерную модель были внесены уточнения по коэффициенту скорости сопла φ по результатам трехмерного численного расчета.

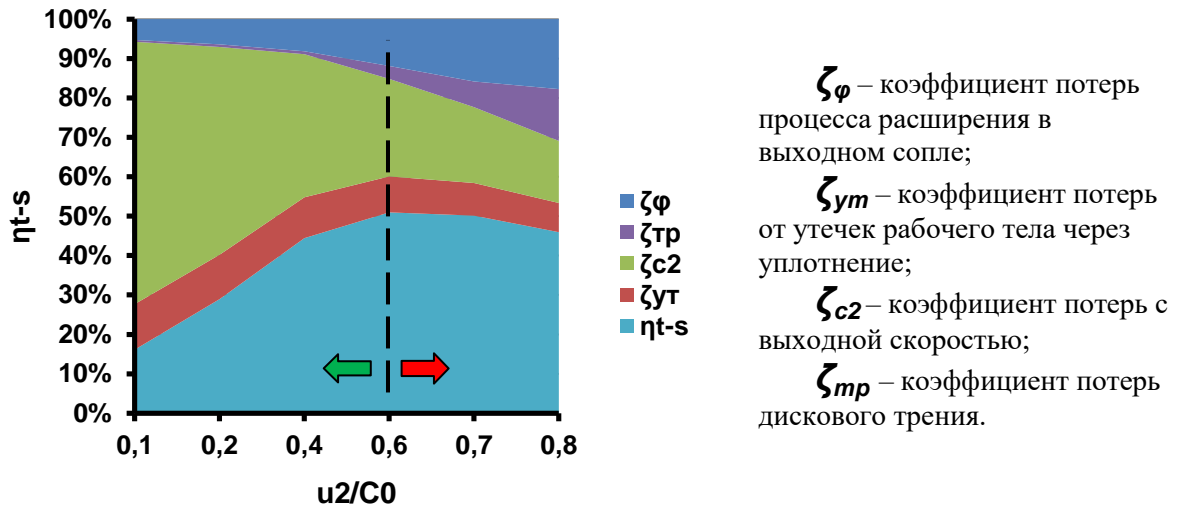


Рисунок 6 – Диаграмма потерь и эффективности ЦБРТ

Основными источникам потерь являются несовершенство процесса расширения в сопле и потери с утечкой рабочего тела, ключевой вклад в снижение эффективности вносят потери с выходной кинетической энергией.

С целью увеличения эффективности ЦБРТ таким образом были сформулированы три группы мероприятий:

1. Сверхзвуковое профилирование сопла ЦБРТ.
2. Использование диффузора для уменьшения потерь с выходной скоростью и стабилизации параметров потока на выходе из рабочего колеса.
3. Совершенствование бесконтактных и применение контактных уплотнений для сокращения расхода утечки рабочего тела.

Ввиду большего количества работ, посвященных сверхзвуковому профилированию, этот вопрос подробно в диссертационном исследовании не затрагивался.

В четвертой главе выполнена разработка и численная апробация осевого диффузора для ЦБРТ. Описаны факторы, оказывающие влияние на эффективность диффузора. Предложено несколько вариантов конструкции с выбором оптимальной и обоснованием причин ее лучшей работы.

В качестве основных определяющих факторов, определяющих эффективность диффузора, обычно выделяют:

- угол закрутки потока на выходе из турбины в абсолютном движении;

- активную струю перетечки через радиальный зазор;
- неравномерность параметров потока в окружном и радиальном направлении;
- степень турбулентности потока.

Для конструктивной реализации ЦБРТ не характерно наличие радиальной перетечки, как в осевых турбомашинах. Однако перетечка через уплотнение требует учета при моделировании диффузора, поскольку втекает в диффузор и оказывает влияние на режим течения в нем. Для полного учета всех факторов, определяющих эффективность работы диффузора, проводится совместное моделирование диффузора и рабочего колеса ЦБРТ. Схема утечек рабочего тела и общий вид модели диффузора с ЦБРТ приводится на рисунке 7.

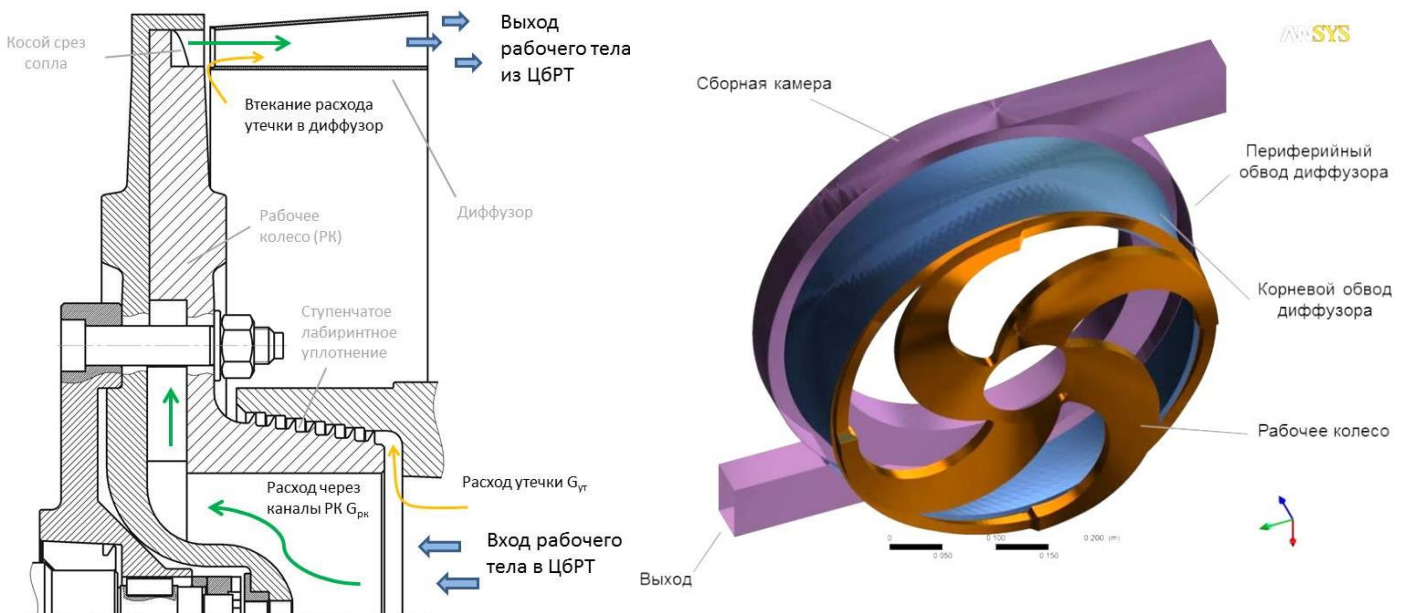


Рисунок 7 – Схема утечек рабочего тела и общий вид модели диффузора с ЦБРТ

Автором было спроектировано и исследовано 6 вариантов диффузоров для определения их оптимальной конфигурации. Исследованные варианты представлены на рисунке 8.

Было показано, что, несмотря на дозвуковую скорость в абсолютном движении потока, выходящего из рабочего колеса, преимущество имеют варианты диффузоров с конфузорным начальным участком. Автор объясняет отмеченную особенность высокой неравномерностью полей параметров выходящего потока и положительным влиянием конфузорности канала на их выравнивание. Диффузор с гиперболическими обводами (вариант V6) демонстрирует наибольший коэффициент восстановления давления $c_p=0,14$ ввиду хорошего соответствия гиперболическому характеру течения потока с малыми углами выхода в абсолютном движении.

Результаты апробации диффузора с гиперболическими обводами показывают прирост мощности ЦБРТ на 5% и внутреннего КПД на 2,3% на режиме максимальной эффективности при $u_2/C_0=0,6$. Также, заметно существенное уменьшение объемов вихревых зон по сравнению с вариантом работы ЦБРТ с выходным патрубком, как показано на рисунке 9.

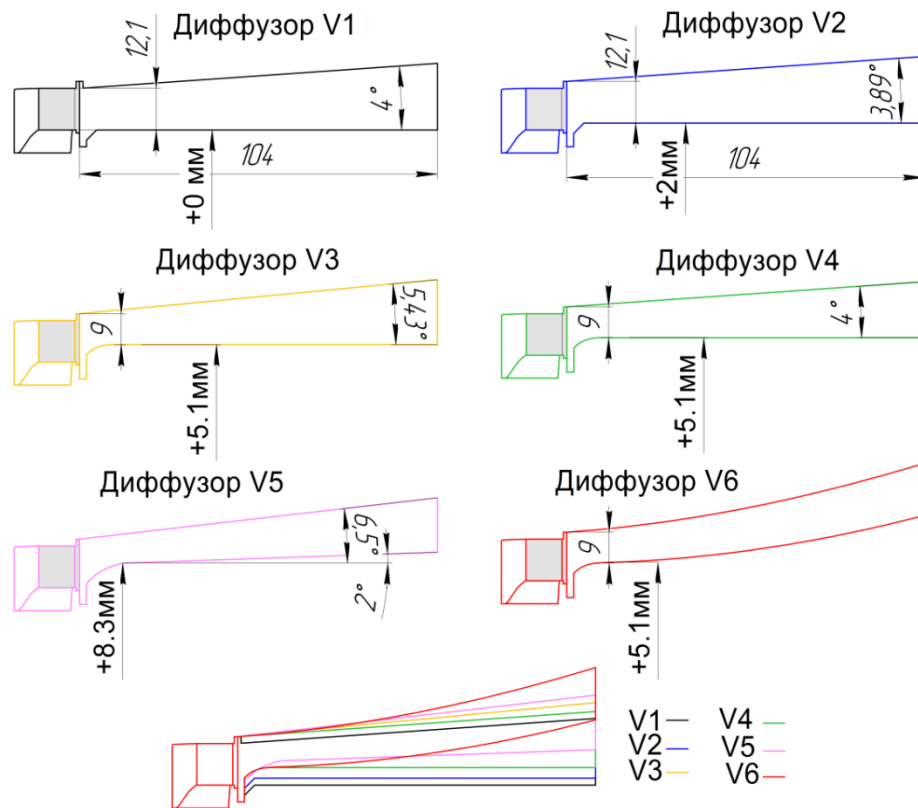


Рисунок 8 – Исследованные варианты диффузоров ЦБРТ

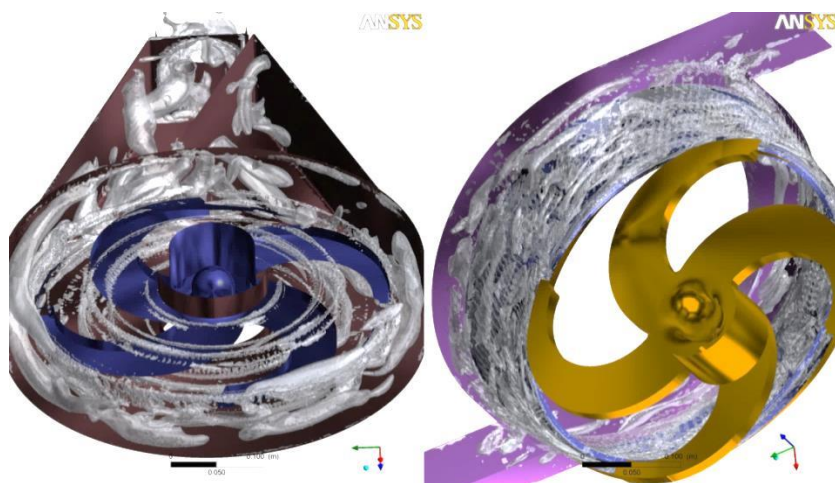
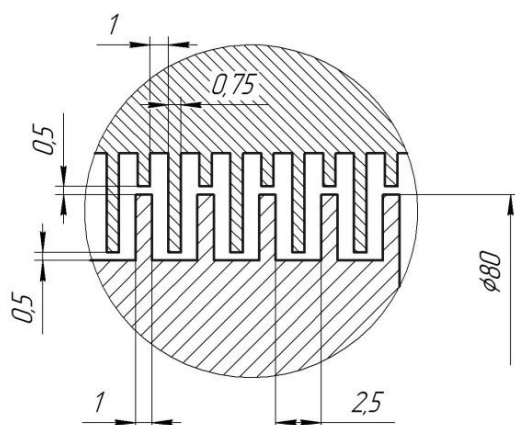


Рисунок 9 – Поле завихренности по критерию λ_2 на выходе ЦБРТ с патрубком и диффузором

В главе также выполнена проработка бесконтактного ступенчатого лабиринтного уплотнения и определена целесообразность применения контактных уплотнений в ЦБРТ. Выполнена апробация ступенчатого лабиринтного уплотнения с целью оценить его эффективность по сравнению с петлевым лабиринтным, рисунок 10. Общий вид расчетной модели представлен на рисунке 11.

Петлевое уплотнение ЦБРТ



Ступенчатое уплотнение ЦБРТ

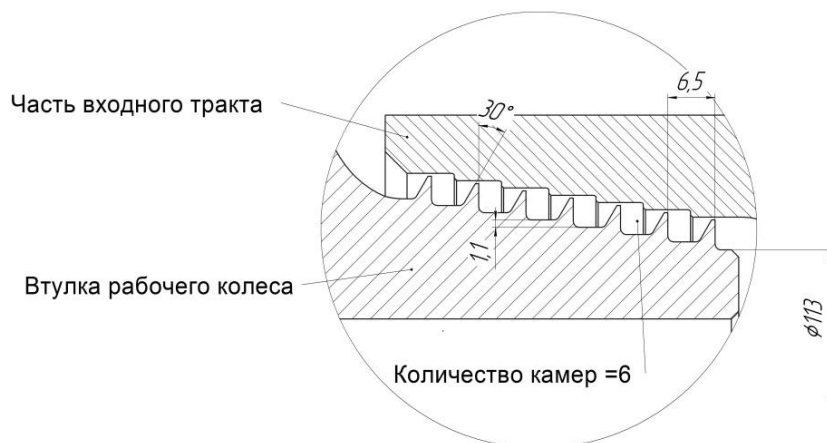


Рисунок 10 – Эскизы лабиринтных уплотнений

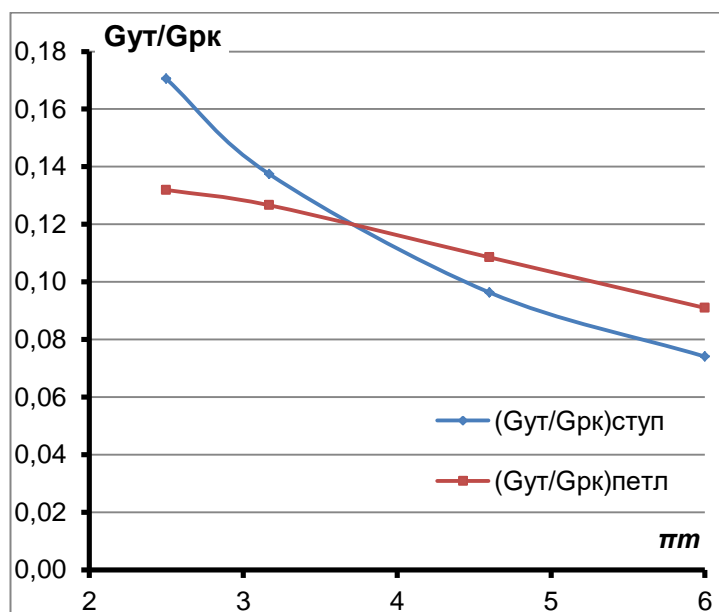
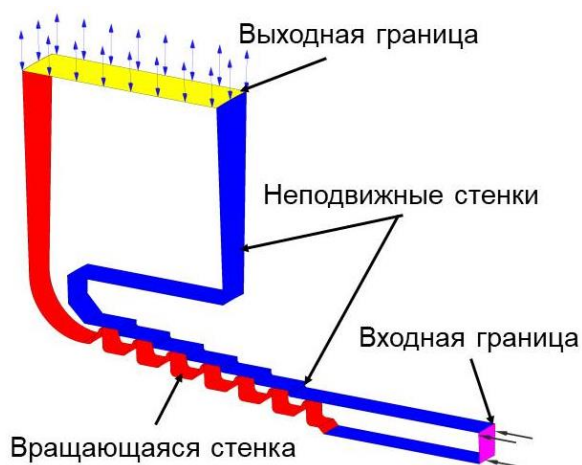


Рисунок 11 – Общий вид расчетной модели определения утечек и результаты расчетов

Результаты расчетов в широком диапазоне степеней понижения давления приведены на рисунке 11, показан относительный расход как отношение расхода утечки к расходу рабочего тела через рабочее колесо. Ступенчатое уплотнение позволяет уменьшить расход утечки на 15-20% при степенях понижения давления $\pi_t > 3,5$, характерных для работы ДГА. Предложенное уплотнение имеет существенно меньшие требования к точности обеспечения осевого зазора. Обзор конструкций и параметров

современных контактных уплотнений дополняет главу и определяет потенциал увеличения эффективности ЦБРТ за счет их применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа охватывает широкий круг вопросов, посвященных созданию ДГА малой мощности для использования на объектах газотранспортной системы. В диссертации последовательно рассматриваются как общие вопросы актуальности применения ДГА малой мощности, так и вопросы разработки оптимальных расширительных машин с учетом режимных параметров объектов газотранспортной системы.

Получены следующие выводы и результаты:

1. Суммарный потенциал генерации электроэнергии на ДГА позволяет существенным образом покрыть собственные нужды газотранспортной системы в электрической энергии. При этом примерно на 40% ГРС возможна выработка не более 100 кВт электрической мощности, что определяет актуальность ДГА малой мощности. Около 10% объектов имеют потенциал генерации в 1 МВт, и не более 3% - более 2,5 МВт. Потенциал генерации на объектах газотранспортной системы высок как в газодобывающих странах, но также и в странах, импортирующих природный газ.
2. Предложены различные схемные решения с интеграцией ДГА малой мощности в системы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Это позволяет достигать эффективного электрического КПД до 75% и выше без дополнительного сжигания топлива.
3. Доказано, что безлопаточные турбины более предпочтительны в ДГА ввиду лучших эксплуатационных показателей и технологической простоты. На основе сравнения эксплуатационных показателей и значений эффективности сделан обоснованный вывод о перспективности применения ЦБРТ в составе ДГА.
4. Разработаны одномерная математическая модель и методика трехмерного численного моделирования ЦБРТ, верифицированные по данным экспериментального исследования модельной ступени. Определены точность и границы применимости разработанных одномерной и трехмерной методик расчета. Трехмерный нестационарный расчет демонстрирует завышение значения внутреннего КПД ЦБРТ не более чем на +2,2% при $\pi_7 < 5$.

5. Проведена апробация ЦБРТ в составе ДГА подходом численного моделирования. Получен внутренний КПД ЦБРТ порядка 49%, чему, с учетом определенных на этапе валидации численной модели корректировок, соответствует порядка 47% эффективности реальной машины.
6. Разработаны и реализованы мероприятия по дальнейшему увеличению эффективности ЦБРТ в составе ДГА. Сформулированы рекомендации по проектированию и расчету диффузоров для ЦБРТ с учетом высокой неравномерности потока на выходе из турбины. Показано, что использование диффузора с гиперболическими образующими позволяет достичь прироста внутренней мощности более чем на 5%, а прироста внутреннего КПД – на 2,3% на режиме максимальной эффективности.
7. Разработаны ступенчатые лабиринтные уплотнения, использование которых позволяет реализовать увеличение эффективности ЦБРТ на 1% на режиме максимальной эффективности. Предложенные уплотнения являются технологичными и упрощают сборку машины в части обеспечения осевого зазора. Обозначены ресурсы дальнейшего повышения эффективности за счет оптимизации геометрии бесконтактных, а также применения контактных уплотнений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

- 1) Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2013. – №1 (166). – С. 45 – 53.
- 2) Автономная энергоустановка, утилизирующая сбросную теплоту газотурбинных агрегатов / Н.А. Забелин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов, А.С. Сайченко // Газовая промышленность. 2016. №9 (743). С. 28 – 36.
- 3) Комплексные энерго- и ресурсосберегающие решения, применяемые на объектах ООО "Газпром трансгаз Санкт-Петербург" / Г.А.Фокин, Н.А.Забелин, В.М, Иванов, М.В. Смирнов // Газовая промышленность. 2018. №6 (769) С. 96-102.

в рецензируемых журналах, индексируемых в базе SCOPUS:

- 1) Prospects of centrifugal reaction turbines for microturbomachinery applications/ Maksim V. Smirnov, Aleksandr A. Sebelev, Viktor A. Rassokhin, Nikolai A. Zabeli et. al. // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. –2017. – Vol 8, Issue 4. – P 1716 – 1723.
- 2) Experimental characteristics of the low consumption turbines with flow outlet small angle and rotor blades with a big spacing ratio/ Rassokhin V A, Fedorov M P, Matveev V Y, Fokin G A, Schisliaev S M, Zabelin N A, Besedin S N, Rakov G L, Smirnov M V.// J. Fundam. Appl. Sci. – 2018. – 10(6S). – P. 68 – 79.

в других изданиях:

- 1) История создания и совершенствования малорасходных турбин / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, А.А. Себелев, М.В. Смирнов, Н.И. Куклина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №5 (24) Часть I. – С. 106 – 113.
- 2) Особенности сравнения физического и численного экспериментов / Н.И. Куклина, А.А. Себелев, М.В. Смирнов, Г.Л. Раков // Мат-лы XLIII научно-практ. конф. с междунар. участ. «Неделя науки СПбПУ»: тез. докл. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 104 – 107.