

На правах рукописи



Себелев Александр Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБИН С  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ СОПЛАМИ

Специальность – 05.04.12 Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

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, профессор,  
**Рассохин Виктор Александрович**

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

**Беседин Сергей Николаевич**  
кандидат технических наук,  
ООО «Научно-технический центр «Микротурбинные  
технологии», генеральный директор,  
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение по  
исследованию и проектированию энергетического  
оборудования им. И.И. Ползунова»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «12» декабря 2017г. 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  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
(<http://www.spbstu.ru>).

Автореферат разослан «    » октября 2017г.

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



Талалов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Повышение эффективности оборудования для таких направлений, как энергетика, газовая промышленность, судостроение, аэрокосмическая промышленность, других отраслей является актуальной задачей современной науки и техники. Решение этой задачи неразрывно связано с совершенствованием рабочих процессов и конструкций таких сложных устройств, как тепловые турбины различного назначения, применяемые в турбинных установках, авиационных двигателях, объектах автономной и транспортной энергетики.

Все более широкое применение в автономной энергетике, транспортных объектах находят турбины, характеризующиеся малыми объемными расходами рабочего тела в сочетании с высокими перепадами энтальпий. Турбины такого класса принято называть малорасходными – МРТ (в зарубежных источниках их называют малоразмерными). Для повышения эффективности МРТ, улучшения массогабаритных показателей и повышения ресурса необходимо совершенствование их рабочих процессов и конструкции.

Сокращение запасов углеводородного топлива, ограничение вредных выбросов турбинных установок, стремление ограничить тепловое загрязнение атмосферы диктуют новые требования к технологическим процессам и вновь проектируемым устройствам. Особое внимание при этом обращают на энергосбережение и энергоэффективность. При этом постоянно растет спрос на электрическую энергию. Так, по данным Мировой энергетической статистики прогнозируемый рост потребления электроэнергии в период с 2008 по 2035гг. составит 53%. Значительную часть этой потребности можно покрыть за счет применения утилизационных турбогенераторов на базе МРТ мощностью от нескольких ватт до нескольких мегаватт, использующих энергию редуцирования природного газа при подаче его конечному потребителю.

Следует отметить, что особенно важным становится использование автономных энергетических установок при энергообеспечении труднодоступных районов, обеспечении независимого аварийного электропитания стратегически важных объектов, а также при децентрализации энергоснабжения объектов различного назначения с целью снижения нагрузки на существующие электрические сети. В настоящее время для этих целей используются микротурбинные установки со сжиганием органического топлива, лидерами в производстве которых являются такие зарубежные фирмы, как Capstone, Ormat, Elliott и т.д.

По целому ряду причин эффективность турбин с малыми объемными расходами рабочего тела ниже эффективности полноразмерных турбин. Так, внутренний КПД осевых МРТ с полным подводом рабочего тела, как правило, не превышает 70...75%. Введение же парциального подвода рабочего тела для увеличения высот проточной части приводит к дополнительному снижению внутреннего КПД таких турбин. В ряде случаев это снижение может достигать 10% и более. В связи с актуальностью применения МРТ в различных установках встает вопрос их совершенствования с целью повышения эффективности при одновременном снижении стоимости.

В последнее время при разработке МРТ часто применяются активные турбинные ступени с плоскими соплами. Тем не менее, целым рядом авторов показаны преимущества активных турбинных ступеней с осесимметричными соплами (ОсС) по сравнению со ступенями с плоскими соплами. В связи с этим, данная работа посвящена вопросу исследования МРТ с ОсС с целью их совершенствования, что, с учетом технологичности и особенностей рабочего процесса на объектах газовой промышленности, является чрезвычайно актуальным в рамках повышения эффективности МРТ в целом.

Настоящая работа выполнена в соответствии с Техническим Задаанием к Федеральной Целевой Программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» 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. Для проведения численного эксперимента использовались вычислительные ресурсы Суперкомпьютерного Центра «Политехнический», занимающего 2-е место по производительности среди суперкомпьютеров России. Вышеизложенное подчеркивает высокую актуальность выполненной работы.

### **Цели и задачи**

**Целью работы** является повышение эффективности МРТ с ОсС за счет совершенствования конструктивных и режимных параметров проточных частей соплового аппарата и рабочего колеса.

Для достижения обозначенной цели работы сформулированы следующие **задачи работы:**

- 1) Обзор современного уровня экономичности осевых МРТ, анализ перспектив и методов дальнейшего совершенствования осевых МРТ с ОсС.
- 2) Выбор и обоснование базового объекта исследования (базовой ступени МРТ).
- 3) Разработка методологического обеспечения для исследования процессов в ступенях осевых МРТ с ОсС.
- 4) Анализ процессов в базовой ступени МРТ и разработка рекомендаций по совершенствованию турбин такого класса на основе результатов численного эксперимента.
- 5) Разработка мероприятий по повышению эффективности базовой ступени МРТ на основе результатов численного эксперимента.
- 6) Разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию осевых МРТ с ОсС.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) Разработаны и математически обоснованы конструктивные мероприятия, позволяющие повысить внутренний КПД осевой МРТ с ОсС не менее чем на 2,1% на номинальном и частичных режимах работы.
- 2) Впервые для ступеней осевых МРТ с ОсС проведены сравнительные стационарные и нестационарные численные исследования. Показано, что на номинальном режиме работы завышение внутреннего КПД ступени по результатам стационарного расчета может достигать 10% по отношению к данным физического эксперимента.
- 3) Разработана и валидирована методика нестационарного расчета осевой МРТ с ОсС, позволяющая описывать физическую картину течения в осевых МРТ с ОсС и в короткие временные сроки получать полный набор параметров рабочего процесса в ступени, в том числе, полную характеристику внутреннего КПД ступени  $\eta_i = f(u/C_0)$ .
- 4) Разработаны математические модели обратной стреловидности лопаток рабочего колеса и кинематического «навала» потока на выходе из соплового аппарата, позволяющие повысить внутренний КПД осевой МРТ с ОсС не менее чем на 2,1% на номинальном режиме работы.

- 5) Показано положительное влияние профилированного осесимметричного корневого обвода на внутренний КПД осевой МРТ с ОсС при работе на частичных режимах, выраженное в приросте на частичном режиме на 1,9%.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Разработаны инженерные методики, позволяющие использовать полученные результаты на начальных этапах проектирования осевых МРТ с ОсС. Показана возможность модификации одномерной методики газодинамического расчета осевых МРТ с ОсС. Разработанный математический аппарат для описания предложенных конструктивных изменений может применяться также и для совершенствования высоконагруженных ступеней полноразмерных турбомашин.

### **Методы исследования**

При выполнении диссертационной работы использовались обзор, анализ и расчетно-аналитические методы исследования. Для проведения исследований построены расчетные модели ступеней осевых МРТ с осесимметричными соплами с применением современных программных пакетов конечно-элементного анализа (ANSYS CFX).

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора складывается из:

- 1) обзора современного уровня экономичности осевых МРТ, анализа перспектив и методов дальнейшего совершенствования осевых МРТ с ОсС;
- 2) разработки, валидации и апробации методики трехмерного газодинамического нестационарного расчета осевых МРТ с ОсС;
- 3) разработки аналитического описания базового объекта и конструктивных мероприятий по его совершенствованию;
- 4) проведения численных экспериментов по исследованию эффективности предложенных конструктивных мероприятий;
- 5) обоснования положительного эффекта предложенных конструктивных мероприятий на основе результатов проведенных численных экспериментов.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

- 1) методологическое обеспечение численного эксперимента для исследования процессов в ступени осевой МРТ с ОсС;

- 2) результаты исследования влияния обратной стреловидности лопаток рабочего колеса на эффективность осевой МРТ с ОсС;
- 3) результаты исследования влияния кинематического «навала» потока на выходе из соплового аппарата на эффективность осевой МРТ с ОсС;
- 4) результаты исследования влияния профилированного осесимметричного корневого обвода рабочего колеса на эффективность осевой МРТ с ОсС;
- 5) рекомендации по дальнейшему совершенствованию осевых МРТ с ОсС.

### **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 физического эксперимента.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях:

- 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) Международная конференция «Изобретатели в инновационном процессе России», Санкт-Петербург, СПбПУ, 20 – 21 декабря 2013г., тема доклада: «Пути совершенствования малорасходных турбин конструкции ЛПИ».
- 4) 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».
- 5) 12<sup>th</sup> International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Lerici, Italy, July 13 – 16, 2015, тема доклада: «Off-design analysis of Organic Rankine cycle (ORC) units with microturbogenerators».

- 6) 3<sup>rd</sup> International Seminar on ORC Power Systems, Brussels, Belgium, October 12 – 14, 2015, тема доклада: «Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine».
- 7) 12<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics & Thermodynamics, ETC12, Stockholm, Sweden, April 3 – 7, 2017, тема доклада: «Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I».
- 8) Результаты работы включены в отчет по Федеральной Целевой Программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» 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 состоит из введения, 4 глав, заключения, списка обозначений и списка литературы. Текст диссертации изложен на 137 страницах, содержит 71 рисунок, 15 таблиц, список использованных литературных источников, включающий 95 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** представлены результаты обзора современных достижений в области осевых малоразмерных турбин. Проанализирован достигнутый уровень эффективности осевых МРТ с различной степенью парциальности подвода рабочего тела (рис.1), баланс потерь в осевой сверхзвуковой МРТ.

Показано, что достигнутый на настоящий момент уровень внутреннего КПД по статическим параметрам осевых сверхзвуковых МРТ составляет 65...70% при степени парциальности подвода рабочего тела 0,8...1. Введение парциального подвода рабочего тела со степенью парциальности менее 0,5 приводит к снижению внутреннего КПД не менее чем на 10%.



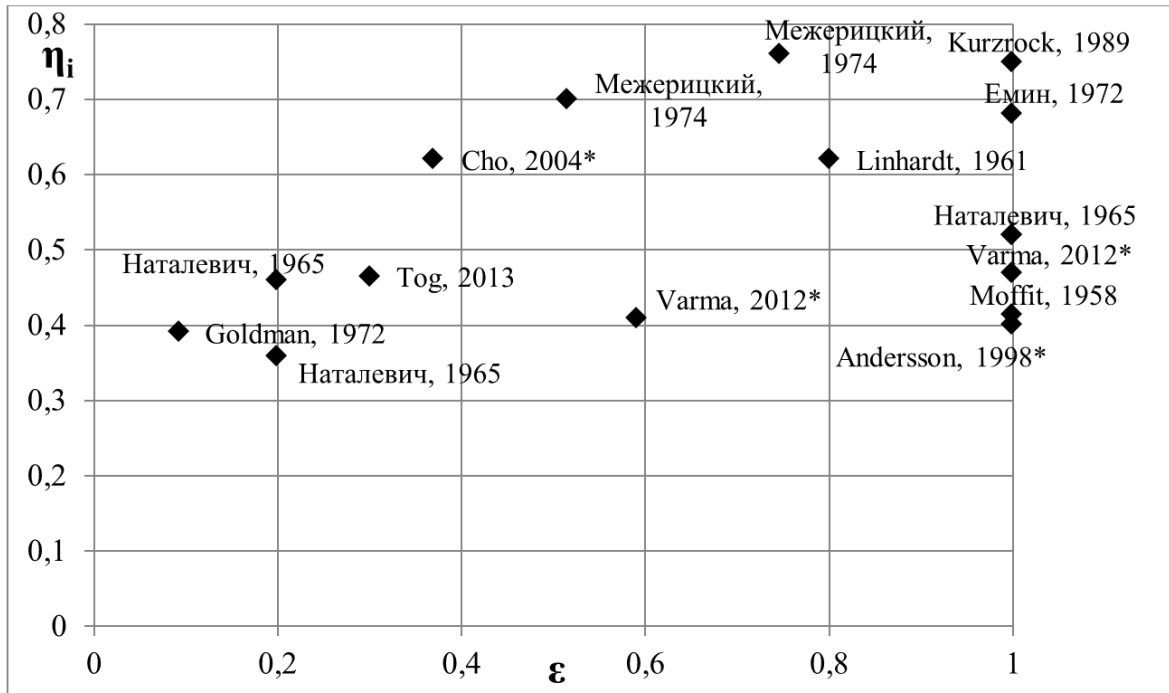


Рисунок 1 – Обзор современного уровня эффективности осевых МРТ в зависимости от степени парциальности

\*КПД по полным параметрам

Проведенный анализ экспериментальных исследований в области влияния наклона входной кромки лопаток рабочего колеса и профилирования корневого обвода на эффективность полноразмерных осевых турбин позволил выбрать в качестве основных направлений исследования:

- 1) применение обратной стреловидности входной кромки рабочих лопаток как инструмент воздействия на направление фронта прямого скачка уплотнения и вторичные потери в рабочем колесе;
- 2) профилирование корневого обвода рабочего колеса как инструмент воздействия на зоны пассивного газа с целью снижения потерь на трение и вентиляцию.

**Во второй главе** произведен выбор и обоснование базового объекта исследования. В качестве базового объекта исследования выбрана активная одноступенчатая МРТ с ОсС со средним диаметром 103,5 мм и степенью парциальности 0,576, экспериментально исследованная ранее в Ленинградском Политехническом Институте. Сопловой аппарат имеет 12 равномерно расположенных по окружности сверхзвуковых осесимметричных сопел с диаметром критического сечения 5,08 мм и геометрическим углом выхода 20°. Рабочее колесо обандажено и имеет 55 лопаток с цилиндрическими образующими высотой 10 мм. Геометрические углы входа и выхода из рабочего колеса составляют 36°. Рабочее тело – воздух, полная температура на входе

в сопловой аппарат – 320 К, давление за ступенью с учетом сопротивления выходного устройства – 0,102 МПа.

Проведен обзор и анализ методики одномерного газодинамического расчета одноступенчатой МРТ с осесимметричными соплами, разработанной в работах Г.Л. Ракова, К.Г. Родина, Р.Р. Симашова. Разработана методика трехмерного численного газодинамического расчета МРТ и проведена ее валидация. В качестве основных выводов следует отметить следующее:

- 1) Показано, что одномерная методика расчета демонстрирует неудовлетворительные результаты при расчете частичных режимов. Обосновано применение одномерной методики в качестве базы для сравнения при анализе результатов трехмерного расчета номинального режима работы МРТ.
- 2) Показано, что при проведении численного трехмерного расчета стационарный подход к временному разрешению приводит к существенному (до 10%) завышению внутреннего КПД ступени в связи с существенным влиянием потерь от нестационарности и потерь на трение и вентиляцию на КПД ступени.
- 3) Проведена валидация разработанной методики трехмерного расчета. Показана удовлетворительная сходимость результатов трехмерного расчета с результатами физического эксперимента. Показано, что при расчете номинального режима различие внутреннего КПД по результатам расчета и эксперимента не превышает 0,5%, а при расчете нерасчетного режима – 5% (рис.2).

Разработанную методику трехмерного газодинамического расчета составляют следующие положения:

- 1) **Точность геометрического моделирования.** Принимается идеальное соответствие расчетных моделей и принятых конструктивных решений. Стенки полагаются гидравлически гладкими.
- 2) **Сеточная дискретизация.** Для одного сектора соплового аппарата и рабочего колеса размерность сетки составляет не менее 1,2 млн. узлов. Высота первой пристенной ячейки выбирается исходя из условия использования высокорейнольдсовых моделей турбулентности ( $30 < y^+ < 300$ ).
- 3) **Граничные условия.** В качестве граничных условий используются стандартные граничные условия для задач турбомашин без моделирования теплообмена (стенки предполагаются адиабатными):

- полное давление и температура на входе в расчетную область. Степень турбулентности на входе в расчетную область принимается равной 5%, поскольку данные об условиях эксплуатации натуральных МРТ отсутствуют;
- частота вращения рабочего колеса;
- статическое давление на выходе из расчетной области.

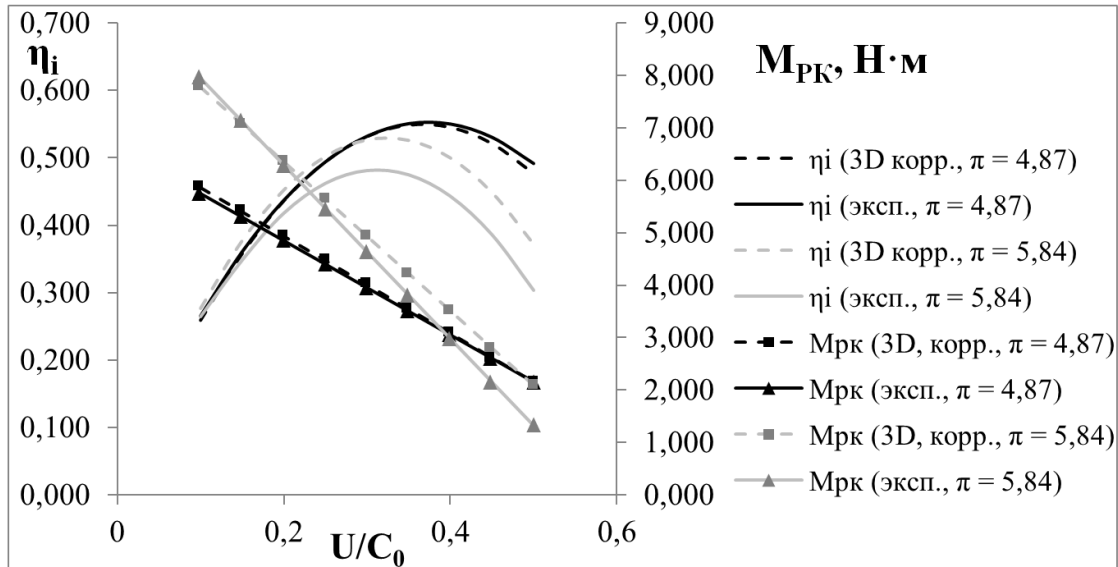


Рисунок 2 – Сопоставление результатов трехмерного расчета с экспериментальными результатами

Применяется подход секторного моделирования, при котором моделируется 1 сопло и 5 межлопаточных каналов рабочего колеса. Соотношение площадей на интерфейсе стыковки соплового аппарата и рабочего колеса составляет при этом 0,917. В стационарной постановке применяется интерфейс Frozen Rotor. На боковые границы доменов соплового аппарата и рабочего колеса накладываются условия периодичности. Типовая расчетная область представлена на рисунке 3. В расчетной модели моделируется бандажное уплотнение. Бандаж смоделирован как одно целое с лопатками рабочего колеса; также заодно с лопатками рабочего колеса смоделирован корневой обвод. Корневой и периферийный обводы за рабочим колесом приняты стенками «без трения», поскольку заранее неизвестна геометрия диффузора за рабочим колесом. К ограничениям расчетной модели следует отнести отсутствие моделирования корневой протечки рабочего тела. Иными словами, в расчетной модели осевой зазор в корне полагается закрытым.

- 4) **Моделирование турбулентности.** Применяются RANS и URANS подходы, модель турбулентности – высокорейнольдсовая версия модели турбулентности SST.

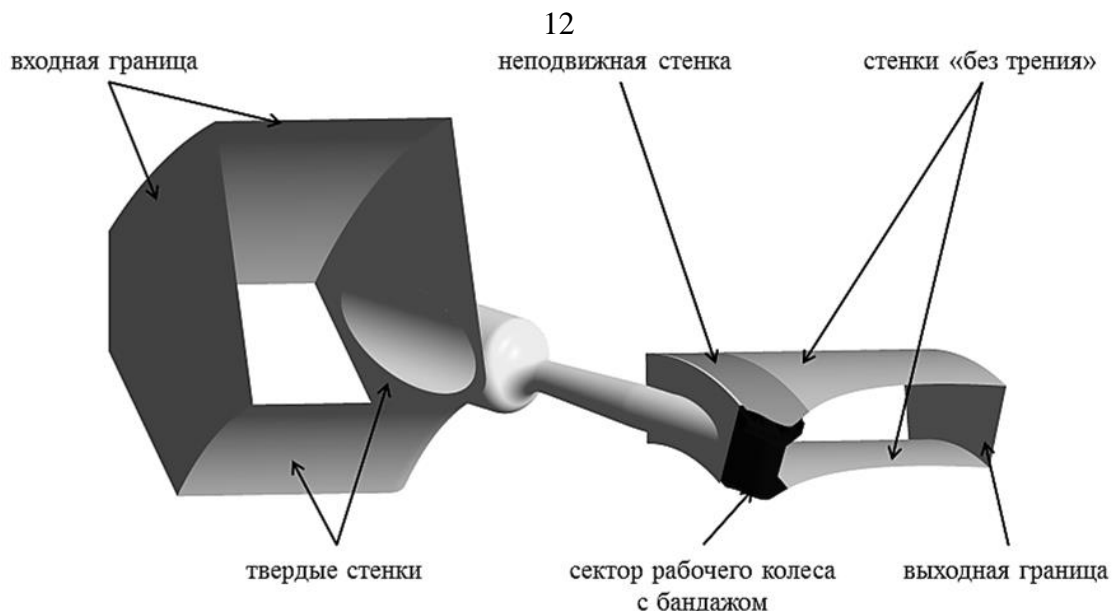


Рисунок 3 – Представление типовой расчетной области

- 5) **Выбор временного шага и типа интерфейса сопряжения неподвижной и вращающейся областей.** Для сопряжения неподвижной и вращающейся областей используется «классический» интерфейс Transient Rotor-Stator. Временной шаг определяется, исходя из условия  $CFL = 1,0...1,5$ , где  $CFL$  – критерий Куранта-Фридрихса-Леви. При постановке нестационарного расчета для последующей обработки результатов закладывается двойное осреднение параметров: осреднение параметров в конкретной геометрической привязке (в конкретном сечении) в рамках каждого шага по времени и осреднение этих параметров по времени.
- 6) **Моделирование рабочего тела.** Рабочее тело полагается идеальным газом с постоянной теплоемкостью.
- 7) **Критерии сходимости решения:**
- уровень нормализованных небалансов менее 1%;
  - падение невязок более чем на 2 порядка;
  - отсутствие изменения параметров в точках мониторинга более чем на 5%.

Для нестационарных расчетов изменение параметров в точках мониторинга должно быть периодичным.

На основе результатов трехмерного расчета проведен анализ структуры течения в базовой ступени. В результате анализа показаны явления, приводящие к существенному снижению внутреннего КПД исследуемой ступени:

- 1) взаимодействие прямого скачка уплотнения от входных кромок лопаток рабочего колеса с потоком в косом срезе соплового аппарата;

- 2) отрыв потока от спинки лопаток рабочего колеса при повороте в межлопаточных каналах.

**В третьей главе** разработаны и обоснованы конструктивные мероприятия по повышению эффективности осевых МРТ с ОсС. В ходе проектирования рабочего колеса с обратной стреловидностью лопаток объем исследования был расширен. В результате представлены исследования влияния на эффективность базовой ступени:

- 1) радиальности лопаток рабочего колеса;
- 2) обратной стреловидности лопаток рабочего колеса;
- 3) кинематического «навала» потока на выходе из соплового аппарата;
- 4) профилирования корневого обвода рабочего колеса;
- 5) совместного применения обратной стреловидности, профилированного корневого обвода и кинематического «навала».

Исследования проводились для расчетного режима  $\pi_T = 5$  и частичного режима  $\pi_T = 2,67$  с анализом кривых  $\eta_i = f(u/C_0)$  (рис.4 – 7).

Исследование радиальности лопаток рабочего колеса показало прирост эффективности ступени лишь на частичном режиме  $\pi_T = 2,67$ . Прирост составил 1,8% при более пологой кривой  $\eta_i = f(u/C_0)$ . На расчетном режиме введение радиальности лопаток рабочего колеса существенно не отразилось на эффективности ступени (рис.4).

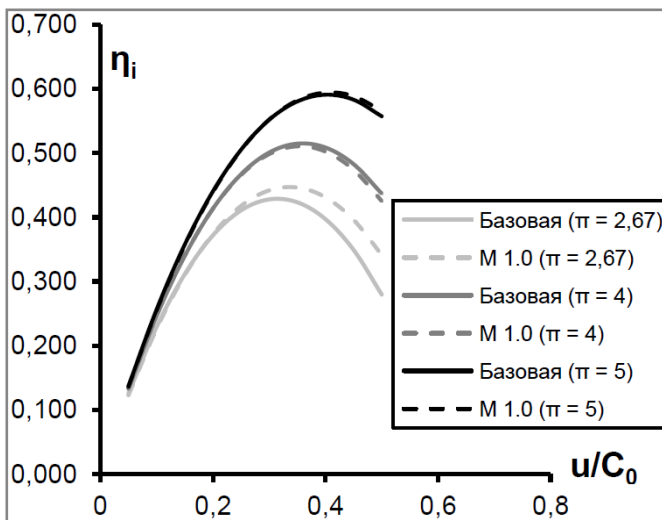


Рисунок 4 – Кривые внутреннего КПД базовой ступени и ее модификации М 1.0 с радиальными лопатками

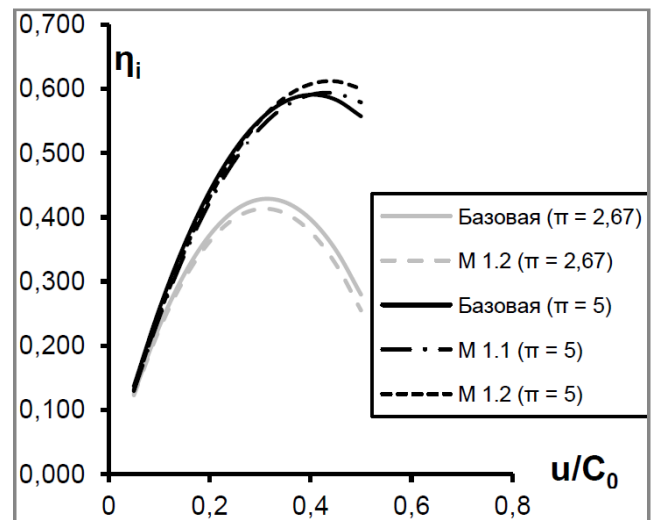


Рисунок 5 – Кривые внутреннего КПД базовой ступени и ее модификаций М 1.1 и М 1.2 со стреловидными лопатками и кинематическим «навалом»

Исследование обратной стреловидности лопаток рабочего колеса проводилось в сочетании с исследованием кинематического «навала» потока на выходе из соплового

аппарата. Введение обратной стреловидности лопаток рабочего колеса вкупе с положительным кинематическим «навалом» (модель М 1.2) на расчетном режиме  $\pi_T = 5$  привело к увеличению эффективности ступени на 2,9% при  $(u/C_0)_{opt}$  и на 4,3% при  $(u/C_0) = 0,5$ . В то же время, отсутствие кинематического «навала» (модель М 1.1) при обратной стреловидности лопаток привело к нестабильности процессов в ступени и появлению прироста эффективности на 2,2% лишь при  $(u/C_0) = 0,5$  (рис.5). На частичном режиме ступень со стреловидными лопатками и положительным кинематическим «навалом» продемонстрировала ухудшение эффективности на 1,5% по отношению к базовой ступени за счет неоптимального перераспределения расхода между сечениями.

Исследование профилирования корневого обвода (рис.6) показало, что за счет данного мероприятия удастся снизить интенсивность отрыва от спинки лопаток при повороте потока в межлопаточных каналах. Тем не менее, добиться существенного прироста эффективности ступени на номинальном режиме за счет профилирования корневого обвода не удалось. Положительный эффект ступени с профилированным корневым обводом продемонстрировали на частичном режиме: приросты эффективности составили +1% у ступени с более «резким» корневым обводом (модель М 2.1) и +1,9% у ступени с более «плавным» корневым обводом (модель М 2.2).

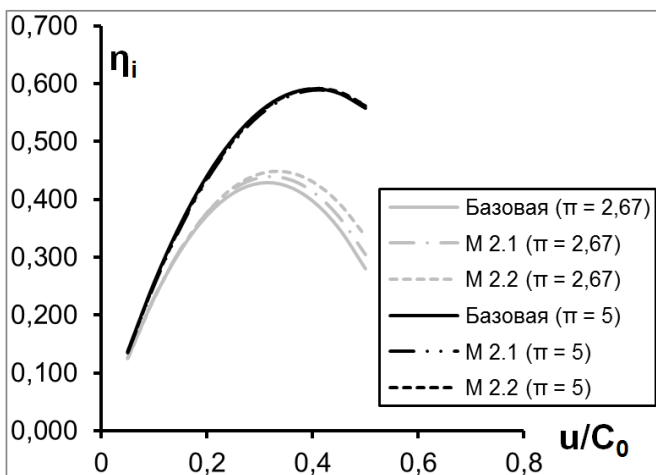


Рисунок 6 – Кривые внутреннего КПД базовой ступени и ее модификаций М 2.1 и М 2.2 с профилированным корневым обводом

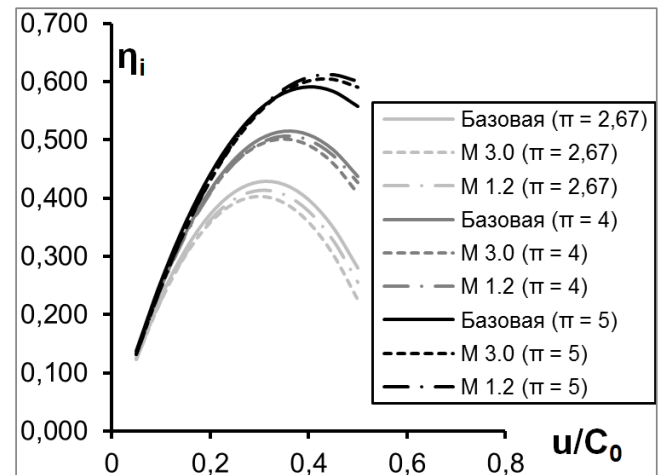


Рисунок 7 – Кривые внутреннего КПД базовой ступени и ее модификации М 3.0 в сравнении со ступенью М 1.2

Исследование совместного применения профилированного корневого обвода, обратной стреловидности лопаток рабочего колеса и положительного кинематического

«навала» (рис.7) показало, что использование положительного «навала» и профилированного корневого обвода является взаимоисключающим. Спроектированная ступень продемонстрировала снижение эффективности в коридоре 0,6...1% на всех режимах по отношению к аналогичной ступени без корневого обвода. Прирост эффективности такой ступени относительно базового объекта составил +1,9% на расчетном режиме.

**В четвертой главе** показана эффективность разработанных конструктивных мероприятий при применении их в осевых МРТ с ОсС с альтернативными, по отношению к базовому объекту исследования, размерами проточной части. Определена нижняя граница степени парциальности положительного кинематического «навала» и обратной стреловидности рабочих лопаток ( $\varepsilon = 0,4$ ), ниже которой применение данных мероприятий не приведет к повышению эффективности МРТ.

Разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию МРТ с ОсС. Показаны возможности модификации одномерной методики расчета осевых МРТ с ОсС Р.Р. Симашова для расчета турбин перспективных конструкций с целью первичного определения границ применимости того или иного конструктивного мероприятия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

- 1) Выполненный комплекс исследований с применением численных стационарных и нестационарных методов показал возможность повышения эффективности осевых малоразмерных турбин (МРТ) с осесимметричными соплами (ОсС) за счет совершенствования конструктивных и режимных параметров проточных частей соплового аппарата и рабочего колеса более чем на 2 абсолютных процента.
- 2) Выполненная работа показала, что совместное применение положительного кинематического «навала» потока на выходе из соплового аппарата и обратной стреловидности лопаток рабочего колеса позволяет повысить внутренний КПД как обандаженных, так и необандаженных осевых МРТ с ОсС не менее чем на 2,1% на номинальном режиме работы.
- 3) Применение профилированного осесимметричного корневого обвода положительно сказывается на эффективности осевых МРТ с ОсС лишь на частичных режимах. При этом большую величину прироста внутреннего КПД демонстрируют более «плавные» обводы, при которых перекрыша в корне уменьшается, но не ликвидируется полностью. Такая конструкция

продемонстрировала прирост внутреннего КПД на 1,9% на частичном режиме по сравнению с базовой ступенью.

- 4) Проведенный обзор и анализ современного уровня экономичности осевых МРТ с ОсС показал, что достигнутый на настоящий момент уровень внутреннего КПД МРТ с ОсС не превышает 50% при степени парциальности  $\varepsilon = 0,2 \dots 0,4$  и 65...70% при степени парциальности  $\varepsilon = 0,5 \dots 0,8$ .
- 5) Отсутствие явно выраженной радиальной компоненты скорости на входе потока в рабочее колесо осевой МРТ с ОсС при введении нулевого кинематического «навала» приводит к нестабильности потока и отсутствию прироста внутреннего КПД.
- 6) Исследование частичных режимов работы осевых МРТ с ОсС, в которых применены совместно обратная стреловидность и положительный кинематический «навал», показало снижение внутреннего КПД, связанное с неоптимальным перераспределением расхода между сечениями рабочего колеса. Величина степени парциальности менее  $\varepsilon < 0,4$  является границей, ниже которой наблюдается снижение внутреннего КПД при введении обратной стреловидности и положительного кинематического «навала».
- 7) Показано, что введение радиальности лопаток рабочего колеса осевой МРТ с ОсС практически никак не отражается на эффективности и режимных параметрах ступени. Некоторый прирост внутреннего КПД (до 1%) наблюдается лишь на частичных режимах. При этом, однако, выполнение лопаток рабочего колеса радиальными является технологически более сложной операцией по сравнению с изготовлением классических цилиндрических лопаток.
- 8) Дополнение усовершенствованной осевой МРТ с ОсС с обратной стреловидностью лопаток рабочего колеса и положительным кинематическим «навалом» профилированным осесимметричным корневым обводом приводит к снижению эффективности усовершенствованной МРТ. В этой связи одновременное применение положительного кинематического «навала» и профилированного корневого обвода следует считать взаимоисключающим.
- 9) Проведенные сравнительные стационарные и нестационарные расчеты осевой МРТ с ОсС, валидированные по результатам физического эксперимента, показали, что в рамках стационарного расчета номинального режима работы турбины завышение внутреннего КПД ступени составляет от 8 до 10%. Причиной такого расхождения



является неучет нестационарного взаимодействия соплового аппарата и рабочего колеса.

На основе результатов проведенных исследований даны следующие рекомендации:

- 1) Применение обратной стреловидности лопаток рабочего колеса и положительного «навала» целесообразно для повышения внутреннего КПД осевых МРТ с ОсС на номинальном режиме работы при степени парциальности  $\varepsilon > 0,35$ .
- 2) Применение профилированного осесимметричного корневого обвода рабочего колеса целесообразно для повышения внутреннего КПД осевых МРТ с ОсС на частичных режимах работы.
- 3) Применение радиальности лопаток рабочего колеса в осевых МРТ с ОсС целесообразно лишь при реализации рабочих лопаток с обратной стреловидностью по соображениям прочности.
- 4) Применение профилированного корневого обвода рабочего колеса и положительного кинематического «навала» является взаимоисключающим.

#### **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) 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 – 41.
- 3) 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.

##### **в рецензируемых журналах, индексируемых в базе SCOPUS:**

- 4) Rakov G., Rassokhin V., Zabelin N., Olennikov S., Sebelev A., Sukhanov A., Schislyayev S. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia // International Journal of environmental & science education. 2016. Vol. 11(18). pp. 11721 – 11733.

- 5) Smirnov M.V., Sebelev A.A., Zabelin N.A., Kuklina N.I. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I // Proceedings of 12<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics & Thermodynamics. ETC12, Stockholm, Sweden, 2017. ETC2017-100.

**в других изданиях:**

- 6) Опыт численного моделирования течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов // ANSYS Advantage. 2012. №17. С. 26 – 33.
- 7) Забелин Н.А., Себелев А.А., Смирнов М.В. Пути совершенствования малорасходных турбин конструкции ЛПИ // Мат-лы всероссийской конф. «Изобретатели в инновационном процессе России»: тез. докл. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 73 – 76.
- 8) История создания 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.
- 9) Rassokhin V., Zabelin N., Kunte H., Seume J., Olennikov S., Cherkasova M., Sebelev A. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines // In: Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. Polytechnical University Publishing House, 2014. pp. 139 – 155.
- 10) 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.
- 11) Sebelev A., Scharf R., Zabelin N., Smirnov M. Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar on ORC Power Systems. Brussels, Belgium, 2015. pp. 640 – 649.