

На правах рукописи



Сайченко Александр Сергеевич

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ
С ОРГАНИЧЕСКИМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Специальность – 05.04.12 Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

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: кандидат технических наук, доцент,
Забелин Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: **Лисянский Александр Степанович**
доктор технических наук, ПАО «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург, директор дирекции проектирования тихоходных агрегатов;

Осипов Александр Вадимович
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, и.о. заведующего кафедрой «Турбиностроение».

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «Микротурбинные технологии», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «19» июня 2018 г. в 16.00 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 « » апреля 2018 г.

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



Талалов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из путей решения задачи повышения энергоэффективности, определенной Федеральным законом РФ от 23 ноября 2009 г. № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», является разработка способов и устройств для утилизации средне- и низкопотенциальной теплоты газотурбинных установок, котельных агрегатов, оборудования химической, металлургической и нефтяной промышленности. Накопленный мировой опыт показывает рентабельность и эффективность такого подхода с использованием турбоустановок, работающих по органическому циклу Ренкина (ОЦР) на низкокипящих органических рабочих телах (ОРТ). Такие установки применяются для утилизации теплоты уходящих газов не только газотурбинных двигателей (ГТД), но также при утилизации биогаза, в солнечной и геотермальной энергетике. Очень масштабным может быть применение турбинных установок с ОРТ на объектах ПАО «Газпром», где суммарная величина располагаемой тепловой мощности уходящих газов всех эксплуатируемых ГТД составляет 87,9 ГВт.

Разработка эффективных паровых турбин с ОРТ для подобных установок требует создания стендов для экспериментального подтверждения выполненных расчетов и проектных решений. При этом для каждого используемого ОРТ необходимо создание индивидуального лабораторного стенда, что обусловлено существенным различием термодинамических свойств низкокипящих ОРТ. Создание же унифицированного лабораторного стенда для исследования турбин с ОРТ весьма затруднительно.

Одним из способов решения означенной задачи является проведение исследований паровых турбин с ОРТ на аэродинамических стендах, с учетом положений теории подобия и возможностей применения современных расчетных пакетов. Такой подход позволяет использовать воздуходувные средства и аэродинамические стенды существующих лабораторий для исследования турбомашин. Основная сложность заключается в том, что ОРТ не являются идеальными газами, их физические свойства существенно изменяются в процессе расширения в турбинной ступени, что требует особого подхода к применению теории подобия.

В рамках НИОКР «Разработка опытного образца комбинированной парогазовой утилизационной установки для выработки электроэнергии на собственные нужды газовых компрессорных станций», выполняемой на кафедре «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбПУ, рассчитана и спроектирована утилизационная паротурбинная установка (УПТУ) мощностью 560 кВт с ОРТ гексаметилдисилоксан (ММ).

УПТУ включает в себя двухпоточную паровую турбину, состоящую из двух зеркально отображенных турбинных ступеней с общим ротором.

Для подтверждения полученных интегральных характеристик турбинной ступени с ОРТ ММ необходимо проведение экспериментальных лабораторных исследований. При этом использование ОРТ весьма затруднительно, так как потребуются создание полноразмерного экспериментального стенда со всеми элементами тепловой схемы, что по стоимости соизмеримо с промышленной установкой.

Значительно снизить затраты позволит исследование модели разработанной турбинной ступени на воздухе с использованием имеющихся воздуходувных средств и лабораторных стендов, что обосновывает актуальность темы выполненной диссертационной работы.

Цели и задачи

Целью работы является разработка методики моделирования процесса расширения в турбинной ступени с ОРТ гексаметилдисилоксан и проведение ее исследования на экспериментальном стенде с использованием в качестве рабочего тела сжатого воздуха.

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

- 1) Обзор истории развития, сфер применения турбинных установок с ОРТ и экспериментальных стендов для их исследования.
- 2) Выполнение численного расчета натурной турбинной ступени с ОРТ ММ на режимах частичной нагрузки. Определение значений критериев подобия ступени.
- 3) Разработка методики расчета предварительных граничных параметров модельных режимов турбинной ступени. Численный расчет модельных режимов с рабочим телом воздух.
- 4) Разработка экспериментальной установки, методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Монтаж и наладка экспериментальной установки.
- 5) Исследование модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на экспериментальном стенде с использованием в качестве рабочего тела сжатого воздуха.
- 6) Анализ результатов экспериментального исследования и сравнение их с данными натурной турбинной ступени.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) Разработана методика расчета предварительных граничных параметров модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле.
- 2) На основе методики моделирования турбомашин и численных расчетов турбинной ступени с ОРТ ММ определены режимы работы модели ступени с воздушным рабочим телом, удовлетворяющие критериям подобия и допустимым параметрам аэродинамического стенда.
- 3) Получено экспериментальное подтверждение расчетных интегральных характеристик модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на аэродинамическом стенде. Максимальный внутренний КПД модельной турбинной ступени при работе на воздухе составил $58,8 \pm 2,4\%$ (уровень доверия $p = 68,27\%$), при этом результат численного расчета показал, что при работе натурной ступени на ОРТ ММ на соответствующем режиме, внутренний КПД составляет 60%.

Теоретическая и практическая значимость

Разработана и апробирована методика, позволяющая проводить экспериментальные исследования турбинной ступени с ОРТ ММ на экспериментальном стенде с использованием в качестве рабочего тела сжатого воздуха на различных режимах работы. Это позволяет в дальнейшем, при создании новых турбинных ступеней с ОРТ, проводить экспериментальные исследования их моделей на имеющихся воздушных экспериментальных стендах.

Методы исследования

В диссертационной работе использовались расчетно-экспериментальные методы на основе фундаментальных физических законов. Построена расчетная модель базовой турбинной ступени с применением современных программных пакетов конечно-элементного анализа (ANSYS CFX) для проведения численного исследования. При анализе данных экспериментальных исследований применялся метод математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- 1) Выбор и обоснование режимов для проведения экспериментальных исследований на воздушном стенде.

- 2) Методика расчета предварительных граничных параметров модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле.
- 3) Результаты численных расчетов режимов работы турбинной ступени с ОРТ ММ и расчетов работы модели турбинной ступени на воздухе.
- 4) Результаты исследования режимов модели турбинной ступени с ОРТ ММ на экспериментальном стенде с использованием в качестве рабочего тела сжатого воздуха.
- 5) Анализ отклонения полученных результатов экспериментальных исследований от расчетных характеристик натурной турбинной ступени.

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена использованием в процессе выполнения работы апробированных методик численного расчета и экспериментальных исследований турбомашин. Экспериментальное исследование проводилось с применением современных измерительных приборов, прошедших калибровку непосредственно перед проведением исследования и показавших приемлемый уровень оценки неопределенности результатов измерений.

Личный вклад автора

Личный вклад автора складывается из:

- 1) обзора современного уровня развития паротурбинных установок на основе ОЦР и экспериментальных стендов для их изучения;
- 2) разработки методики расчета предварительных граничных параметров модели турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле;
- 3) проведения численных расчетов модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле;
- 4) разработки, контроля производства, сборки и пуско-наладки экспериментального стенда и измерительной системы;
- 5) проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных;
- 6) обоснования возможности моделирования турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушное рабочее тело, опираясь на результаты экспериментального и расчетного исследований.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1) Открытая научно-практическая конференция молодых работников ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, май 2012 г., тема доклада: «Разработка парогазовой установки мощностью 250 кВт для утилизации теплоты уходящих газов газоперекачивающих агрегатов».

2) Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 1 – 6 декабря 2014 г., тема доклада: «Разработка паротурбинной установки мощностью 560 кВт для утилизации теплоты уходящих газов турбоприводных газоперекачивающих агрегатов».

3) Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность и экология – 2016», Санкт-Петербург, СПбПУ, 19 – 22 мая 2016 г., тема доклада: «Разработка экологически чистой паровой турбины на органическом рабочем теле для утилизации вторичной тепловой энергии».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и 4 приложений. Текст диссертации с приложениями изложен на 155 страницах, содержит 76 рисунков, 26 таблиц, список использованных литературных источников, включающий 71 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор современного уровня развития паротурбинных установок с ОРТ, работающих по ОЦР, и распределение их по сферам применения (рис.1). Лидирующей сферой применения является геотермальные установки. На рисунке 2 приведена диаграмма суммарной мощности вводимой в эксплуатацию установок с ОЦР. Из диаграммы видно, что начиная с 2005 года, наблюдается тенденция существенного роста значений, до величины 470 МВт/год в 2017 году, при суммарной установленной в мире мощности 2750 МВт. В главе также приведены характеристики установок основных производителей.

В главе 1 также приведен обзор экспериментальных стендов, предназначенных для исследования натуральных паротурбинных установок с ОРТ. Обзор показал, что к 2015 году в

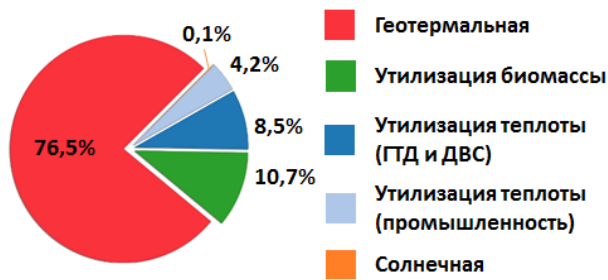


Рисунок 1 – Распределение установленной мощности установок с ОЦР по источникам теплоты

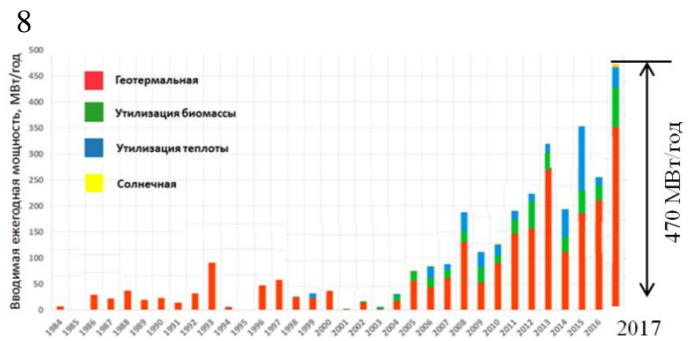


Рисунок 2 – Диаграмма ежегодного ввода в эксплуатацию установок с ОЦР

мире было создано более 67 экспериментальных стендов. Однако, большинство из них имеют малую мощность, лишь 13 стендов превышают мощность 9 кВт при максимальном значении 700 кВт. В рамках проведенной работы особенно интересными являются 3 стенда, работающие за счет утилизации теплоты уходящих газов ГТД и двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Анализ стендов показал, что для каждого разрабатываемого образца паротурбинной ступени необходимо создание индивидуального лабораторного стенда с учетом свойств используемого ОРТ. Это вызвано существенным различием термодинамических свойств низкокипящих ОРТ в диапазонах изменения параметров, характерных для турбинных ступеней. Следствием этого является существенное различие массовых расходов, определяющих характеристики питательного насоса, парогенератора и конденсатора стенда.

Таким образом, создание унифицированного экспериментального стенда для исследования турбин с ОРТ весьма затратно – его стоимость сопоставима со стоимостью натурной промышленной установки с ОЦР.

Одним из вариантов решения такой задачи, является исследование моделей турбинных ступеней с ОРТ на воздушном рабочем теле на уже имеющихся аэродинамических стендах.

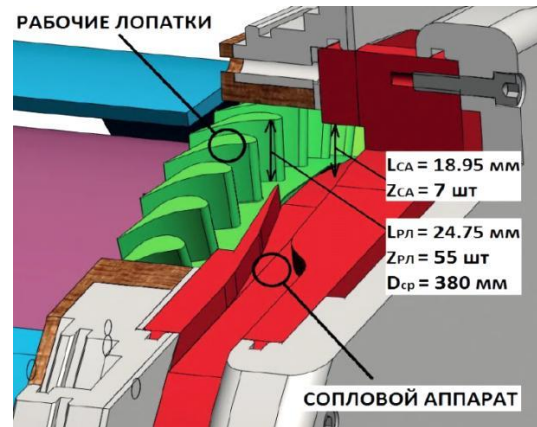
Однако обзор литературы по подобным исследованиям не дал результатов, за исключением одной работы Чун Сен Вонга¹, в которой изложены результаты численного исследования процесса моделирования работы турбинной ступени с воздушного рабочего тела на ОРТ (фреоны R123 и R245fa). В исследовании не было достигнуто положительных результатов из-за сильного отклонения критериев подобия турбинных ступеней.

Далее в главе представлена информация об объекте исследования – паровой турбине с ОРТ ММ, разработанной на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ в рамках НИОКР «Разработка опытного образца комбинированной

¹ Choon Seng Wong. Design Process of Low Temperature Organic Rankine Cycle. PhD thesis. – 2015.

парогазовой утилизационной установки для выработки электроэнергии на собственные нужды газовых компрессорных станций».

Была разработана турбинная ступень конструкции ЛПИ для двухпоточной паровой турбины внутренней мощностью 560 кВт при внутреннем КПД $\eta_i=75\%$. В диссертации исследовалась турбинная ступень, соответствующая одному потоку, мощностью 280 кВт, представленная на рисунке 3. Отличительной особенностью ступени является то, что при коэффициенте понижения давления $\pi_T=25$, температурный перепад составляет всего 40°C .



L – высота; Z – количество; D – диаметр;
 CA – сопловой аппарат; PL – рабочая лопатка

Рисунок 3 – Конструкция турбинной ступени с ОПТ ММ

Для подтверждения характеристик разработанной ступени необходимо проведение экспериментального исследования, что обосновывает цель работы.

Во второй главе приведено описание объекта исследования, его геометрические и газодинамические параметры. Особенностью является то, что сопловой аппарат (СА) состоит из 7 сопловых каналов, имеющих тангенциальный подвод, а геометрический угол выхода потока в окружном направлении ракен 7° . При этом степень парциальности ступени составляет 0,97. Рабочее колесо (РК) состоит из 55 рабочих лопаток (РЛ), выполненных заодно с диском. Средний диаметр ступени равен 380 мм. Параметры номинального режима работы турбинной ступени с ОПТ ММ представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры номинального режима работы турбинной ступени с ОПТ ММ

Параметр	Размерность	Значение	Параметр	Размерность	Значение
P_0^*	МПа	1	π_T	–	25
T_0^*	К	477,1	G	кг/с	6,842
P_2	МПа	0,04	U/C_0	–	0,660
T_2	К	431,1	ρ_T	–	0,429
n	об/мин	12000	ρ_K	–	0,489
h_0	Дж/кг	66260	M_{C1}	–	1,816
η_i	–	75%	M_{W2}	–	1,567

В главе представлена теория моделирования турбомашин, используемая для проведения испытаний натурной ступени на модельном рабочем теле, в данном случае воздухе. Согласно теории, турбинные ступени считаются подобными в случае одновременного выполнения геометрического, кинематического и динамического подобия. В данном случае рассматриваются геометрически идентичные турбинные

ступени. Приведено обоснование моделирования числа Маха по правилу $M_1 = \text{idem}$. Таким образом, модельная ступень должна иметь идентичные натурной следующие значения: η_i , U/C_0 ; M_{C1} ; M_{W1} ; M_{C2} ; M_{W2} ; ρ_T ; ρ_K , а также равные безразмерные треугольники скоростей.

Моделирование номинального натурального режима с использованием рабочего тела воздуха требует давление более 2,5 МПа, что невозможно получить на компрессорной станции лаборатории. Поэтому были выбраны четыре частичных режима работы натурной ступени (таблица 2 и рис. 4), модельные режимы которых удовлетворяют максимальным параметрам аэродинамического стенда ($P^*_0 = 1$ МПа, $G = 12$ кг/с, $n = 18000$ об/мин).

Таблица 2. – Параметры режимов натурной ступени

№ Реж.	P_0^* , Па	T_0^* , К	P_2 , Па	π_T
1	99395	436,5	40000	2,482
2	156181	442,6		3,904
3	184588	444,9		4,593
4	227182	447,9		5,674
Ном.	1000000	477,1		25

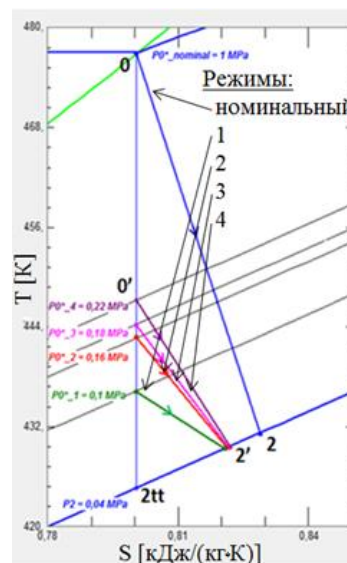


Рисунок 4 – T-S диаграмма ОПТ ММ

Далее в главе приводится численный расчет натурной ступени на режимах частичной нагрузки с целью определения максимального КПД в зависимости от частоты вращения РК. Расчет проводится в программном пакете ANSYS CFD. Применяется подход секторного моделирования, когда исследуемая расчетная область турбинной ступени состоит из двух расчетных сеток (рис. 5): одного канала СА с входным сегментом и восьми каналов РЛ, с соотношением площадей на поверхности интерфейса 0,982. На расчетную область накладывается условие циклической симметрии. Используется интерфейс Frozen Rotor. Применяется высокорейнольдсовая модель турбулентности $k-\omega$ SST с автоматическими пристеночными функциями. Была построена неструктурированная умеренно подробная сетка с элементами в ядре потока в виде тетраэдров и пограничным слоем потока близ твердых поверхностей в виде слоев из призматических элементов. Значения безразмерных пристенных координат сеток лежат в диапазоне $30 < (y^+)_{\max} < 300$. Согласно исследованию, приведенному в работе Епифанова А. А.², построенные сетки обладают свойствами сеточной независимости.

² Епифанов, А. А. Численное моделирование трехмерного течения в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Епифанов Андрей Андреевич. – СПбГПУ, 2014. – 122 с.

В численном расчете натурной ступени использовалась модель реального газа Ридлиха-Квонга. Для моделирования вязкости использовалась модель невзаимодействующих сфер. Ранее такой подход был апробирован в работе Себелева А. А.³. В расчете используется стационарный подход к временному разрешению с осреднением параметров по четырем положениям РК.

Представлена методика обработки численных расчетов. Для каждого из режимов была определена оптимальная частота вращения РК, соответствующая максимальному значению КПД ступени. На рисунке 6 приведены результаты расчетов для режима №3.

Приведена разработанная методика расчета предварительных граничных параметров воздушной модели. Методика базируется на знании критериев η_i ; $\frac{U}{C_0}$; M_{W2} ; W_2 ; h_0 натурной ступени и предположении, что выдерживается полное подобие. В результате получают предварительные значения модельной ступени P_0^* и n , остальные параметры T_0^* и P_2 задаются.

Данные параметры необходимы для проведения базового численного расчета модельного режима, по результатам которого проводится анализ на выполнение требований теории моделирования и корректируются граничные параметры воздушной модели (P_0^* и n). Поиск модельного режима завершается, когда выполняется одновременное равенство в натурной и модельной ступенях параметров U/C_0 и M_{W2} . Полученные модельные режимы представлены в таблице 3.

³ Sebelev A., Scharf R., Zabelin N., Smirnov M. Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine // Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems. Brussels, Belgium. – 2015. – P. 640 – 649.

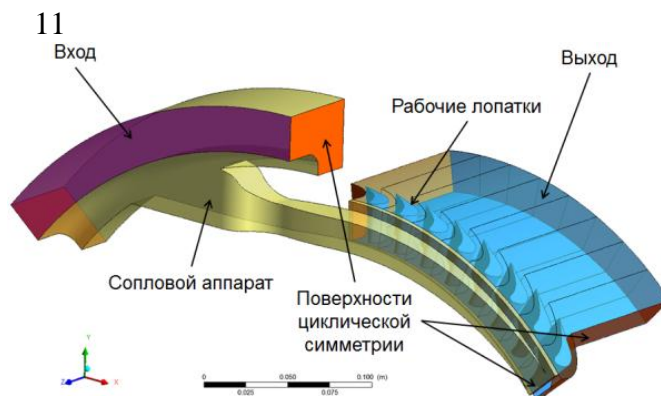


Рисунок 5 – Расчетная область турбинной ступени

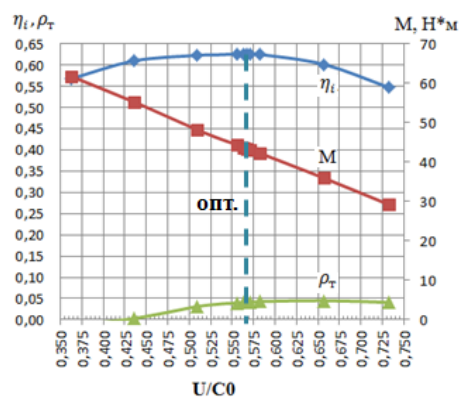


Рисунок 6 – Зависимости η_i ; ρ_τ ; M от $\left(\frac{U}{C_0}\right)$ турбинной ступени с ОПТ ММ на режиме №3

Таблица 3. – Параметры натуральных и модельных режимов

№ Реж.	Раб. тело	P_0^* , Па	T_0^* , К	π_r	n , об/мин	N , Вт	G , кг/с	η_i	U/C_0	ρ_r	ρ_k	M_{C1}	M_{W1}	M_{C2}	M_{W2}	Re_{W2}
1	ММ	99395	436,5	2,482	4440	6197	0,665	0,476	0,446	0,025	-0,174	1,113	0,502	0,393	0,300	3,0E+05
	Воз.	308000	343,2	3,126	9899	51994	1,083	0,501	0,446	0,028	-0,174	1,126	0,516	0,378	0,300	2,4E+05
2	ММ	156181	442,6	3,904	6252	17685	1,042	0,578	0,514	0,035	-0,144	1,492	0,637	0,549	0,402	4,0E+05
	Воз.	471700	343,2	4,781	12877	120529	1,66	0,584	0,514	0,043	-0,127	1,463	0,627	0,518	0,402	3,8E+05
3	ММ	184588	444,9	4,593	7000	24302	1,232	0,601	0,543	0,033	-0,118	1,601	0,651	0,614	0,438	4,4E+05
	Воз.	537580	343,2	5,469	14057	150643	1,893	0,600	0,543	0,049	-0,098	1,552	0,632	0,586	0,438	4,4E+05
4	ММ	227182	447,9	5,674	7850	35489	1,516	0,627	0,571	0,041	-0,083	1,715	0,680	0,673	0,518	5,2E+05
	Воз.	713800	343,2	7,246	15669	234823	2,514	0,627	0,571	0,049	-0,060	1,730	0,676	0,674	0,518	5,7E+05

Далее был проведен анализ отклонения модельных результатов от натуральных по критериям кинематического и динамического подобия. Анализ показал, что на режиме №1 имеется самое большое относительное отклонение по величине внутреннего КПД равное 5,3%, что равняется 2,4% абсолютного значения. На режиме №2 имеется самое большое относительное отклонение по числу Маха M_{C2} равное 5,6%, что равняется 0,031 абсолютного значения. Моделирование по числу Рейнольдса по скорости W_2 обеспечено. Самые большие относительные отклонения имеют коэффициенты кинематической и термодинамической реактивности. Это связано с их малой абсолютной величиной, поэтому моделирование по этим критериям считается удовлетворительным.

Для наглядности идентичности процессов в натурной и модельной ступенях, в разделе приведены треугольники безразмерных скоростей (рис. 7), линии тока, поля чисел Маха (рис. 8) и завихренностей.

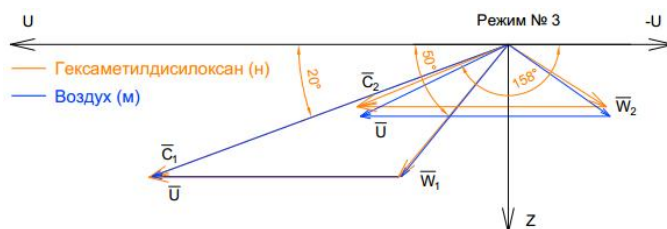
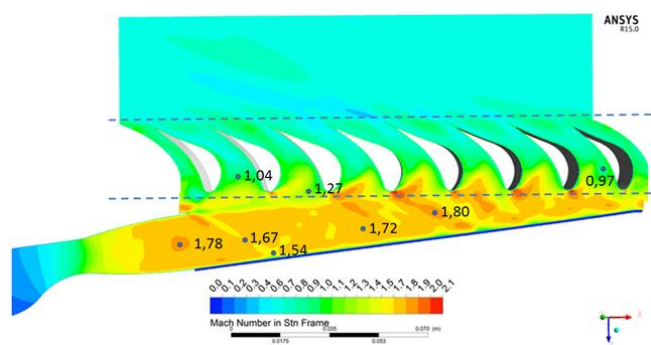
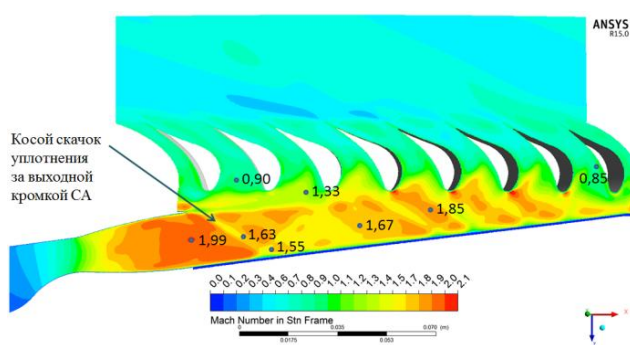


Рисунок 7 – Безразмерные треугольники скоростей на режиме №3



а) Рабочее тело - ММ

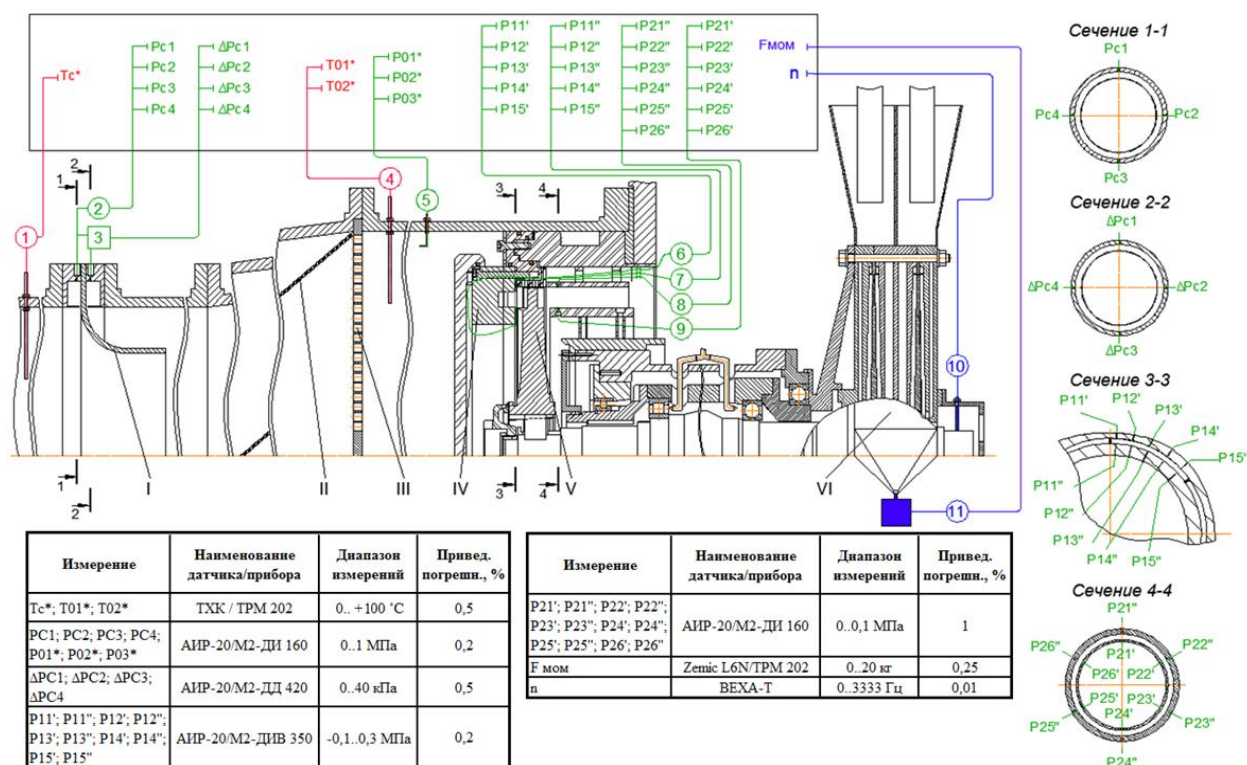


б) Рабочее тело - воздух

Рисунок 8 – Поле числа Маха по абсолютной скорости на средней поверхности канала диаметром 380 мм для натурной (а) и модельной (б) ступеней на режиме № 3

В главе сделан вывод, что рассчитанные модельные режимы подобны натурным по критериям кинематического и динамического подобия с максимальным отклонением не превышающим 5,6%.

В третьей главе представлена информация о разработке экспериментальной установки, входящей в состав аэродинамического стенда (рис.9), предназначенного для физического исследования воздушной модели турбинной ступени с ОПТ ММ, а именно, для верификации результатов численного расчета модельных режимов.



*I – расходомерное сопло; II – воздушный фильтр; III – выравнивающая решетка;
IV – сопловой аппарат; V – рабочее колесо; VI – гидротормоз*

Рисунок 9 – Продольный разрез экспериментального стенда воздушной модели турбинной ступени с ОПТ ММ. Схема измерения параметров стенда

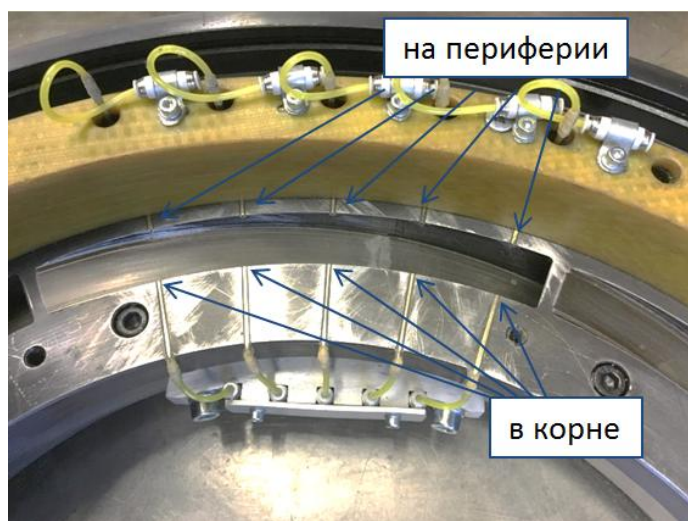
Были рассчитаны режимы эксперимента в зависимости от начальной температуры потока, разработана методика проведения эксперимента с учетом планового образования льда на выходе из турбинной ступени на режимах №3 и 4. На режиме №4 статическая температура потока на выходе из ступени опускается до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение начальной температуры потока перед стендом выше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ требует дополнительной установки проточного нагревателя, что не входило в рамки данного исследования.

Была разработана измерительная система и соответствующая методика обработки данных, позволяющая определять интегральные характеристики ступени: мощность N , внутренний КПД η_i , термодинамическую степень реактивности ρ_T и характеристическое число U/C_0 .

При разработке экспериментальной установки был проведен прочностной и вибрационный расчет РК, произведенного заодно с 55 РЛ. Расчет показал возможность работы ступени на частотах до 18000 об/мин, а также возникновение резонанса на режимах №2 и 3. Турбинная ступень производилась по 3D модели на пятикоординатном станке с числовым программным управлением. Во время производства контролировались все возможные к измерению размеры. Точность производства каналов ступени составила $\pm 0,01$ мм. Далее проводилась сборка и пуско-наладка экспериментального стенда (рис.10), в том числе включающая динамическую балансировку ротора и калибровку измерительной системы.



Рабочее колесо



Сопловой аппарат с системой пневмоотборов

Рисунок 10 – Элементы экспериментального стенда

Таким образом, была разработана, произведена, смонтирована и налажена экспериментальная установка для аэродинамического исследования модели паровой турбины с ОРТ ММ.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования, которое проходило в соответствии с разработанной методикой. В ходе эксперимента была подтверждена правильность выполненных прочностных и режимных расчетов. На режиме № 4 наблюдалось плановое образование тумана и снежно-ледовых отложений на выходе из выхлопного патрубка стенда. Также на режиме № 3, из-за явлений резонанса, ощущалась сильная вибрация фундамента стенда.

Выборка результатов измерений, соответствующих режимам, проводилась по методу трех стандартных отклонений. Расчет неопределенностей измерений проводился согласно ГОСТ, входные величины имеют нормальное распределение.

Полученные результаты экспериментального исследования представлены в таблице 4 и на рисунке 11. Режим №4 в анализе полученных результатов не рассматривался из-за отсутствия технической возможности адекватного проведения испытания.

Таблица 4. – Результаты экспериментального и численных исследований

№ Режима		P_0^* , Па	T_0^* , °C	n , об/мин	N , Вт	G , кг/с	U/C_0	η_i	ρ_{T_cp}
1	ММ, численный расчет	99395	163,3	4440	6196	0,665	0,446	0,476	0,025
	Воздух, численный расчет	308000	51,2	9544	50468	1,083	0,446	0,500	0,029
	Воздух, эксперимент	313031	51,2	9580	51118	1,115	0,449	0,509	0,005
2	ММ, численный расчет	156181	169,4	6252	17685	1,042	0,514	0,578	0,035
	Воздух, численный расчет	471700	72,8	12928	120960	1,654	0,514	0,584	0,043
	Воздух, эксперимент	471874	72,8	13292	117326	1,648	0,532	0,577	0,027
3	ММ, численный расчет	184588	171,7	7000	24302	1,232	0,543	0,600	0,033
	Воздух, численный расчет	537580	71,8	14092	151020	1,888	0,543	0,600	0,049
	Воздух, эксперимент	537246	71,8	14152	144152	1,872	0,550	0,588	0,022
4	ММ, численный расчет	227182	174,8	7850	35488	1,516	0,571	0,626	0,041
	Воздух, численный расчет	713800	77,4	15844	237101	2,488	0,571	0,626	0,049
	Воздух, эксперимент	712893	77,4	15915	201274	2,457	0,580	0,550	0,051

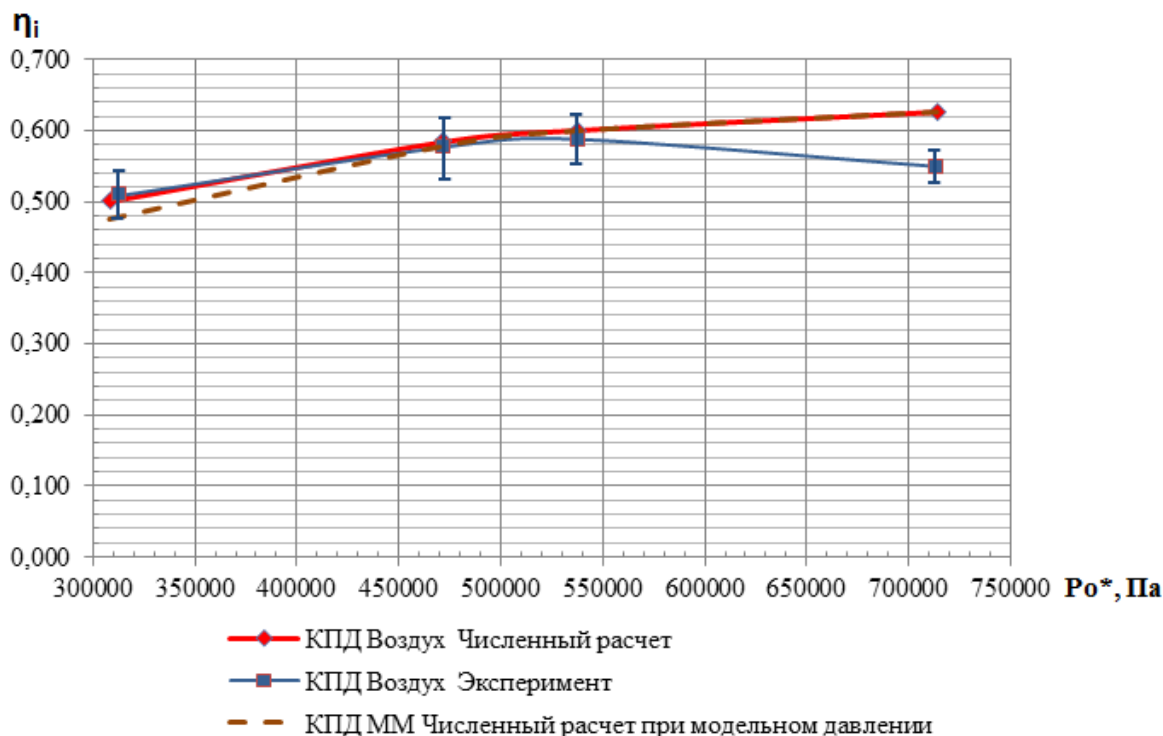


Рисунок 11 – Зависимость $\eta_i = f(P_0^*)$ турбинной ступени на модельных режимах в экспериментальном исследовании на воздухе и в численном расчете на воздухе и ММ

Анализ результатов экспериментального исследования воздушной модели турбинной ступени с ОРТ ММ показывает, что исследование проведено с достаточно высокой точностью, максимальное относительное отклонение граничных параметров эксперимента составляет 2,8% – на режиме №2. Среднеарифметические значения основных характеристик физического эксперимента на режимах № 1, 2 и 3 имеют относительное отклонение от результатов численного расчета на воздушном рабочем теле в диапазоне до 5,7%. Однако, полученные отклонения по КПД полностью перекрываются полем суммарных стандартных неопределенностей, соответствующих уровню доверия $p = 68,27\%$.

Значения большого относительного отклонения по степени термодинамической реактивности ρ_{T_cp} , как уже было сказано, объясняется малым абсолютным значением величины. В связи с этим, далее считается, что требование равенства степени термодинамической реактивности в натурной и модельной ступенях выдержано.

Значения интегральных характеристик коррелируют с данными численного расчета натурной ступени с максимальным относительным отклонением не более **6,9%**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Обзор мирового парка турбоустановок с ОРТ показал, что существует растущий спрос на установки для утилизации низкопотенциальной теплоты. В 2017 году суммарная мощность введенных в эксплуатацию установок с ОРТ составила 470 МВт/год.

2) Разработка высокоэффективных турбинных ступеней с ОРТ требует индивидуальных экспериментальных исследований. Однако, стоимость создания полноразмерного натурального экспериментального стенда с ОРТ соизмерима со стоимостью промышленной установки, что снижает рентабельность создания натурального экспериментального стенда. Одним из путей решения данной задачи является исследование моделей турбинных ступеней с ОРТ на имеющихся экспериментальных стендах с использованием воздуха в качестве рабочего тела.

3) Для натурной турбинной ступени с ОРТ ММ были определены параметры работы на частичных нагрузках, модельные режимы которых обеспечиваются параметрами имеющегося воздушного экспериментального стенда. Максимальное значение давления торможения перед модельной ступенью составило 0,713 МПа при температуре торможения 77,4 °С и частоте вращения ротора 15844 об/мин.

4) Рассчитаны параметры режимов работы турбинной ступени с ОРТ ММ на частичных нагрузках с оптимальными характеристиками и определены значения критериев подобия для каждого из режимов.

5) Разработана методика расчета предварительных граничных параметров модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле. Определение предварительных граничных параметров позволяет осуществить расчеты модельного режима методом последовательного уточнения.

6) Рассчитаны модельные режимы турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле, значения критериев подобия которых отличаются до 5,6% относительно критериев подобия натурной ступени.

7) Разработана, произведена и смонтирована экспериментальная установка для исследования воздушной модели турбинной ступени с ОРТ ММ. Проведена полная пуско-наладка экспериментального стенда и измерительной системы.

8) Проведены экспериментальные исследования модели турбинной ступени с ОРТ ММ на воздушном рабочем теле согласно плану и методике проведения эксперимента.

9) Выполнен анализ полученных данных экспериментального исследования. Рассчитаны суммарные стандартные неопределенности результатов.

10) Получено экспериментальное подтверждение интегральных характеристик модельных режимов турбинной ступени с ОРТ ММ на аэродинамическом стенде. Значения интегральных характеристик коррелируют с данными численного расчета натурной ступени с максимальным относительным отклонением не более 6,9%. Максимальный внутренний КПД модельной турбинной ступени при работе на воздухе составил $58,8 \pm 2,4\%$ (уровень доверия $p = 68,27\%$), при этом результат численного расчета показал, что при работе натурной ступени на ОРТ ММ на соответствующем режиме, внутренний КПД составляет 60%. Полученный результат подтверждает эффективность работы натурной турбинной ступени на режимах частичной нагрузки.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1) Забелин, Н. А. Разработка экологически чистой паровой турбины на органическом рабочем теле для утилизации вторичной тепловой энергии / Н. А. Забелин, А. С. Сайченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. – № 3(249). – С. 5 – 14.

2) Забелин, Н. А. Исследование закономерностей моделирования на воздушном стенде процессов утилизационной турбины с рабочим телом гексаметилдисилоксан / Н. А. Забелин, А. С. Сайченко, А. А. Себелев, В. Н. Сивоконь // Газовая промышленность. 2016. – № 7, 8. – С. 61-69.

3) Забелин, Н. А. Экспериментальное исследование модели органической паровой турбины мощностью 280 кВт / Н. А. Забелин, А. С. Сайченко, В. Н. Сивоконь, Г. А. Фокин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. – №4. – С. 25 – 39.

в других изданиях:

4) Забелин, Н. А. Экспериментальный стенд для исследования высокооборотной воздушной модели одноступенчатой малорасходной турбины конструкции ЛПИ мощностью 260 кВт / Н. А. Забелин, С. Ю. Оленников, А. С. Сайченко, В. Н. Сивоконь, Е. Т. Смирнов, М. В. Смирнов // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. №3 (63). – С. 33 – 39.

5) Рассохин, В. А. Разработка паротурбинной установки мощностью 560 кВт для утилизации теплоты уходящих газов турбоприводных газоперекачивающих агрегатов / В. А. Рассохин, А. С. Сайченко, М. В. Смирнов // Научный форум с международным участием "Неделя науки СПбГПУ": материалы научно-практической конференции. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. – 2014. – ч. 2. – С. 90 – 93.

6) Сайченко, А. С. Разработка парогазовой установки мощностью 250 кВт для утилизации теплоты уходящих газов газоперекачивающих агрегатов / А. С. Сайченко // Открытая научно-практическая конференция молодых работников. Сборник докладов. Газпром трансгаз Санкт-Петербург, – 2012. – I том. – С. 261 – 263.

7) Смирнов, М. В. Пути повышения эффективности малорасходных турбин с большим относительным шагом / М. В. Смирнов, А. С. Сайченко, Н. А. Забелин, Г. Л. Раков // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. – 2013. – ч. 2. – С. 54 – 56.

8) Смирнов, М. В. Численное исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / М. В. Смирнов, А. С. Сайченко, Н. А. Забелин, В. А. Рассохин // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. – 2014. – ч. 2. – С. 54 – 55.