

На правах рукописи



Матвеев Юрий Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН КОНСТРУКЦИИ  
ЛПИ ДЛЯ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Рассохин Виктор Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

заместитель генерального директора  
по научной работе ОАО «НПО ЦКТИ  
им. Ползунова», г. Санкт-Петербург  
Хоменок Леонид Арсеньевич

кандидат технических наук

заместитель директора НИИ  
Энергетики ФГБОУ ВПО  
«СПбГПУ»,

Ведущая организация:

Счисляев Сергей Михайлович  
ООО «Научно-технический центр  
Микротурбинные технологии» (ООО  
«НТЦ МТТ»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «18» декабря 2012 г. в «16» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «    » ноября 2012г.

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



Талалов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Малорасходные турбины (МРТ) широко используются для привода различных вспомогательных агрегатов (генераторов, насосов и др.), в энергетических установках и системах бортовых источников питания космических и подводных аппаратов, в судовых турбинах заднего хода, агрегатах наддува двигателей внутреннего сгорания.

Требования надёжности, простоты и технологичности конструкции, массогабаритные и прочностные ограничения, малые объёмные расходы рабочего тела при высоких начальных параметрах обусловили применение в основном малорасходных турбин (МРТ). Практически во всех областях применения высокая экономичность в широком диапазоне режимов работы является обязательным условием.

В настоящее время редуцирование давления природного газа магистрального газопровода (МГ) (50...70 бар) производится на газораспределительных станциях (ГРС) до давления, необходимого потребителю (3...12 бар), при этом, как правило, энергия сжатого газа не используется. Эту энергию сжатого газа можно использовать в микротурбодетандерных установках (МДГ) для выработки полезной мощности.

Для создания таких установок требуются малорасходные турбины, работающие при сравнительно малых объёмных расходах и высоких начальных параметрах рабочего тела. Использование трансзвуковых и сверхзвуковых высокооборотных турбинных ступеней позволяет срабатывать в них большие теплоперепады энтальпий при сравнительно высокой экономичности, существенно сократить число ступеней турбины и повысить компактность всей установки в целом. Над созданием таких малорасходных турбин с высоким перепадом работают многие организации страны (МАИ, МЭИ, МГТУ, СПбГПУ, СПбМУ, НИИ, КЗТ и др.).

Выполненный анализ показал, что для создания микротурбодетандерных установок, рациональным является применение турбин конструкции ЛПИ, в которых устраняются парциальные потери, характерные для малорасходных турбин. Это обеспечивается малыми углами выхода потока из соплового аппарата, большими углами поворота и относительным шагом в лопатках рабочего колеса. При этом резко сокращается число лопаток, упрощается конструкция и технология изготовления турбины. Особенности кинематики таких турбин позволяют обеспечить их высокую надёжность в условиях высокотемпературного и двухфазного рабочего тела. Такие турбины были предложены профессором И. И. Кирилловым в конце 60-х - начале 70-х годов прошлого века, а в дальнейшем конструктивно разработаны и исследованы на кафедре турбинных двигателей и установок под руководством профессора В.А. Рассохина в СПбГПУ в течение последних 20 лет.

В данной работе рассмотрена возможность использования малорасходных турбин (МРТ) конструкции ЛПИ для применения их в

микротурбодетандерных электрогенераторах для выработки электрической энергии на собственные нужды газораспределительных станций.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка и экспериментальное исследование модельных турбин конструкции ЛПИ для применения их в микротурбодетандерных генераторах для выработки электрической энергии на собственные нужды газораспределительных станций.

Для реализации цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- моделирование параметров натуральных микротурбодетандерных генераторов на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ для их исследования на воздухе на стендах СПбГПУ;
- разработка математической модели расчёта сверхзвуковых одноступенчатых турбин конструкции ЛПИ;
- проведение численного эксперимента в трёхмерной постановке модельной малорасходной турбины конструкции ЛПИ с целью изучения физической картины течения рабочего тела в проточной части и оценки характеристик малорасходной турбины;
- обобщение экспериментальных характеристик исследованных МРТ разного типа с целью использования таких турбин в микротурбодетандерных генераторах;
- создание экспериментальной базы и методик проведения и обработки экспериментальных данных для исследования малорасходных турбин конструкции ЛПИ для повышения их экономичности и надёжности в составе микротурбодетандерных генераторов.

**Научную новизну** диссертационной работы составляют:

- параметры модельной малорасходной турбины для микротурбодетандерного генератора на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ ( $P_0=0,247$  МПа,  $T_0=320$  К,  $n=26100$  об/мин,  $G=0,067$  кг/с);
- математическая модель номинального и переменного режимов работы МРТ, в диапазоне изменения параметров:  $\pi_T = 2...5$ ,  $M_{C1}=1...2$ ,  $T_0 = 288...350$ К;
- физическая 3-D модель течения в малорасходной турбине конструкции ЛПИ;
- физическая структура течения рабочего тела в проточной части малорасходной турбины;
- характеристики модельной малорасходной турбины микротурбодетандерного генератора на номинальном режиме ( $\eta = 0,684$ ,  $n=26100$  об/мин,  $u/C_0=0,454$ ,  $T_2=277$ К) и переменных режимах.

**Практическая значимость:**

- разработана методика расчета и проектирования МРТ для микротурбодетандерного генератора на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ;
- разработаны рекомендации по проектированию турбин для микротурбодетандерного генератора на основе малорасходных турбин

конструкции ЛПИ;

- получены характеристики турбины на номинальном и переменных режимах.

**Личный вклад автора:**

- проведение обзора и анализа литературных данных;

- моделирование малорасходных турбин конструкции ЛПИ для проведения модельных экспериментальных исследований;

- разработка программы проведения эксперимента;

- создание экспериментального стенда, установки, объекта исследования для испытания модельных МРТ;

- проведение экспериментальных исследований малорасходных турбин конструкции ЛПИ;

- проведение анализа полученных экспериментальных данных и выдача рекомендаций.

**Достоверность и обоснованность научных результатов** определяется обобщением большого количества экспериментальных данных, применением в расчетах основных законов сохранения, сравнением экспериментальных данных с результатами численного эксперимента, привлечением современных средств вычислительной математики.

**Методы исследования и достоверность полученных результатов.**

При проведении исследований использовались теоретические и экспериментальные методы, достоверность которых апробирована результатами сравнительных испытаний.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались и докладывались на:

- Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов на XXXVII неделе науки СПбГПУ в 2008 году;

- Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов на XXXVIII неделе науки СПбГПУ в 2009 году;

- VIII Международном энергетическом форуме "ТЭК России в XXI веке" в 2009 году;

- XVII Международной научно-методической конференции СПбГПУ в 2010 году;

- 22-ой международной выставке «Изобретения, инновации и технологии» ITEX 2011, Малайзия г. Куала-Лумпур. Получена золотая медаль и специальный приз за лучшую разработку в области защиты окружающей среды;

- 11-м Петербургском международном энергетическом форуме в 2011 году;

- X Московском международном энергетическом форуме (ММЭФ-2012) «ТЭК России в XXI веке»,

- V Петербургском международном инновационном форуме 25-28 сентября 2012г.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы были опубликованы тезисы докладов на различных конференциях, 7 научных статей, в том числе две публикации в изданиях из перечня ВАК.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы из 78 наименований. Она изложена на 140 страницах текста, содержит 85 рисунков, 1 приложение.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы при проектировании новых малорасходных турбин для микротурбодетандерных установок газораспределительных станций.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даётся краткое содержание глав работы.

**В первой главе** приводится обзор и обоснование применения МРТ конструкции ЛПИ для использования в микротурбодетандерных генераторах. Проводится обзор факторов, влияющих на эффективность МРТ:

- малые объёмного расхода рабочего тела приводит к необходимости применения парциального подвода и приводящая к малым высотам проточной части;

- малые значения  $u/c_0$ . Рост окружной скорости ограничивается прочностью РК, снижением высот лопаток или уменьшением парциальности при увеличении диаметра ступени;

- высокие - в основном сверхзвуковые скорости в проточной части;

- возрастание влияния утечек из-за повышенных величин осевых и радиальных зазоров;

- малые диаметры соплового аппарата и рабочего колеса, приводящие к значительной кривизне торцевых ограничивающих поверхностей лопаточных аппаратов, что даёт дополнительные потери;

- у турбин малых размеров снижению КПД способствуют низкие числа  $Re$ .

Применение парциальных МРТ классического типа не позволяет решить поставленные задачи по созданию высокоэффективного малорасходного микротурбодетандерного генератора. Поэтому, в качестве основного варианта МРТ для микротурбинного генератора газораспределительных станций в работе рассматриваются турбины конструкции ЛПИ.

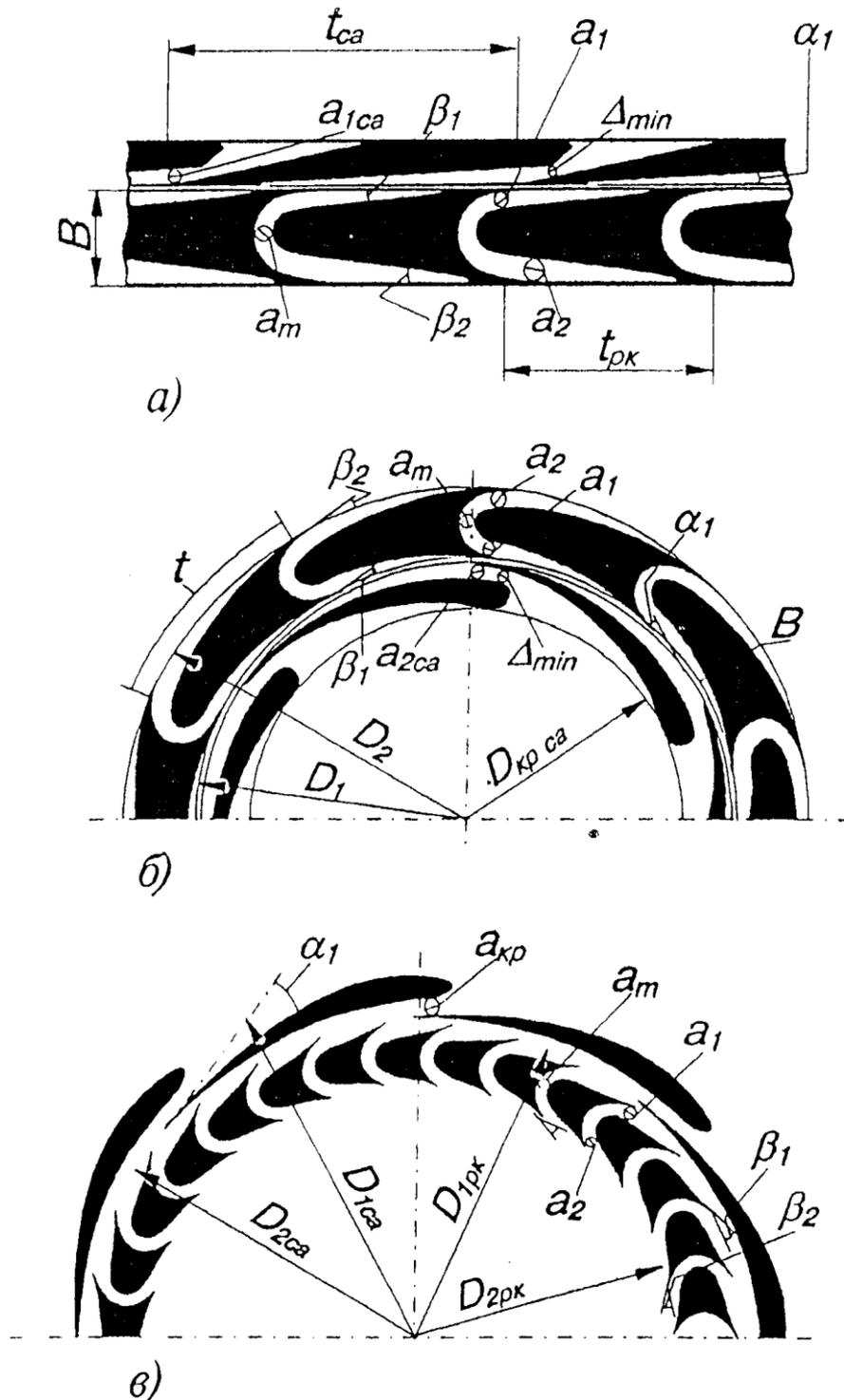


Рис.1. Схема проточных частей малорасходных турбин конструкции ЛПИ:  
 а) – осевая; б) – центробежная; в) – центростремительная.

**Во второй главе** приводится математическая модель расчёта сверхзвуковых малорасходных одноступенчатых турбин конструкции ЛПИ.

Математическая модель рис.2 состоит из следующих блоков:

«Исходные данные», «Геометрическая модель МРТ», «Математическая модель газодинамических процессов в СА», «Модель утечек рабочего тела», «Математическая модель РК на активной дуге», «Математическая модель на

неактивной дуге», «Модель внутренних потерь в МРТ», «Интегральные характеристики».

Математическая модель МРТ построена таким образом, что выполняется процедура поиска корней балансовых уравнений

$$F_1 = G_{CA} - G_{PK} + G_{\delta_1} + G_{Kl} = 0 \quad (1)$$

$$F_2 = G_K - G_{KH} = 0 \quad (2)$$

Процедура поиска корней балансовых уравнений обеспечивает определение такого единственного сочетания давлений  $P_1$  и  $P_4$  при котором с заданной точностью выполняются балансовые уравнения:

$$|F_1| < \varepsilon_1, \quad (3)$$

$$|F_2| < \varepsilon_2, \quad (4)$$

Используется комбинированный алгоритм.

Корни уравнений (3) и (4) определяются методом минимизации функции «режима»  $F$ :

$$A = \sum_{i=1}^2 (F_i) < \varepsilon_2 - \text{методом золотого сечения.}$$

В результате выполненного анализа натуральных параметров микротурбинного генератора было проведено моделирование для определения режимных параметров модельной турбины с целью определения экономичности модельной турбины на номинальном и переменных режимах работы. При этом выдерживались следующие условия моделирования (равенство критериев подобия):

**Критерии кинематического подобия:**  
коэффициент быстротходности

$$\nu = \frac{u_2}{C_0}, \text{ коэффициент расхода } \varphi = \frac{c_{2z}}{u_2},$$

$$\text{степень реактивности } \rho_T = \frac{H_{2t}}{H_0},$$

выдерживаются в модели, равными соответствующим кинематическим коэффициентам натурной ступени на расчётном режиме с помощью регулирования отношения давлений на ступень и ее нагрузки (в конечном счёте – частоты вращения рабочего колеса).



Рис.2. Расчётная схема математической модели МРТ

### Динамическое подобие

Определяющими критериями динамического подобия являются числа Маха  $M$ , отношение теплоёмкостей  $k$ , числа Рейнольдса  $Re$ , числа Струхала  $Sh$  и критерий Эйлера  $Eu$ .

Критерий Эйлера также выполняется в геометрически подобных ступенях при соблюдении условия  $v=idem$  в натуре и модели. Этот критерий, как показали опыты ЦКТИ, хорошо характеризует моделирование вторичных явлений в потоке при условии  $Eu = idem$  для природы и модели.

### Геометрическое подобие

Главным принципом при выборе масштаба моделирования является стремление к созданию по возможности большеразмерной модели. Очевидно, что при этом достигается лучшее моделирование по определяющим динамическим критериям подобия, в частности по критерию Рейнольдса при точном соблюдении числа Маха. Важным соображением является также более уверенное моделирование геометрии проточной части с учётом возможностей по точности изготовления и выдерживания шероховатости поверхностей деталей, образующих проточную часть ступени. Существенную роль играют размеры модели при травсировании потока в контрольных сечениях, чем больше размеры контрольных сечений, тем, очевидно, меньше абсолютные градиенты неравномерностей распределения параметров потока, а, следовательно, выше точность измерений векторным зондом. Определяющими факторами при выборе коэффициента геометрического подобия проточной части были размеры экспериментального стенда и возможности воздуходувной станции лаборатории. Коэффициента геометрического подобия составил 1.

Результаты моделирования натурной турбины МДГ-20 приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ Пп	Наименование параметра	Разм.	Натурные условия	Модельные условия
1	Число Маха по скорости выхода из НА, $M_{c1}$	-	1,2	1,2
2	Давление перед турбиной, $p_0^*$	Па	$1,5 \cdot 10^6$	$0,247 \cdot 10^6$
3	Температура перед турбиной, $T_0^*$	К	327,4	320
4	Рабочее тело	-	Природный газ	Воздух
5	Расход рабочего тела, $G$	кг/с	0,301	0,067
6	Характеристическое число $u/C_0$	-	0,454	0,454
7	Окружная скорость на периферии РК, $u$	м/с	237,5	172,2
8	Частота вращения ротора, $n$	об/ми	36000	26100
9	Мощность турбины, $N_T$	кВт	29,6	3,5
10	Число Рейнольдса, $Re$	-	$0,69836 \cdot 10^6$	$0,19133 \cdot 10^6$

На основе проведенной оптимизации выполнен и обоснован выбор модельных параметров, произведёно расчётное исследование на номинальном и переменных режимах модельной ступени микротурбодетандерного генератора. Рассмотрены два варианта МРТ- осевая и центростремительная турбина

конструкции ЛПИ. На основании выполненных расчётов были разработаны две модельных МРТ, приведенных на рис. 3, 4.

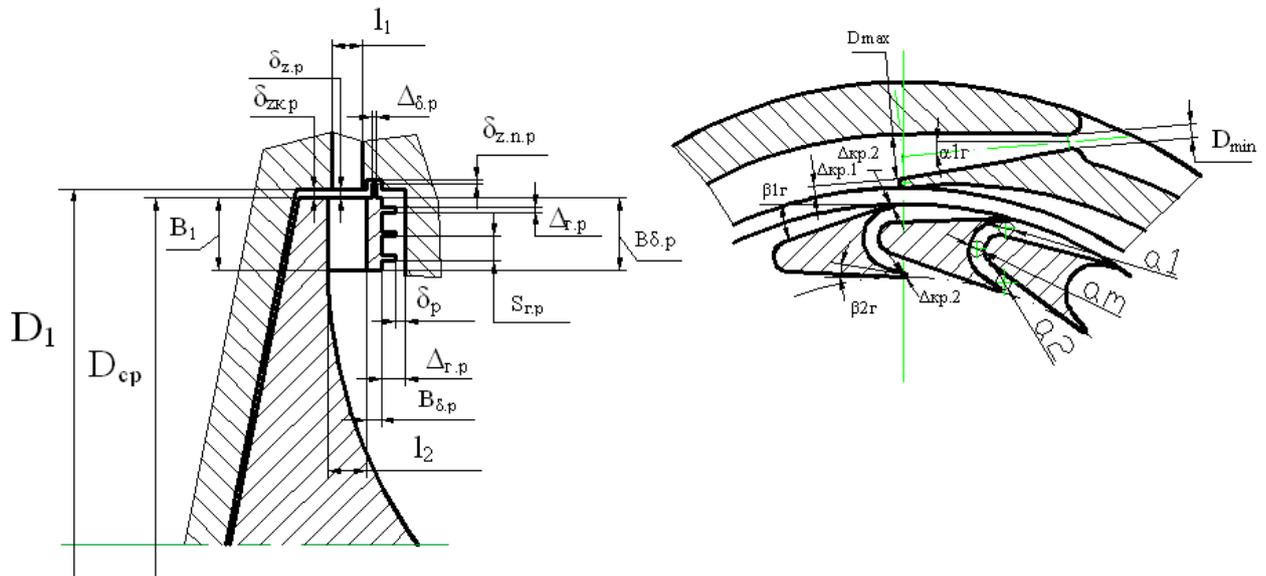


Рис.3. Конструктивная схема центробежной турбины

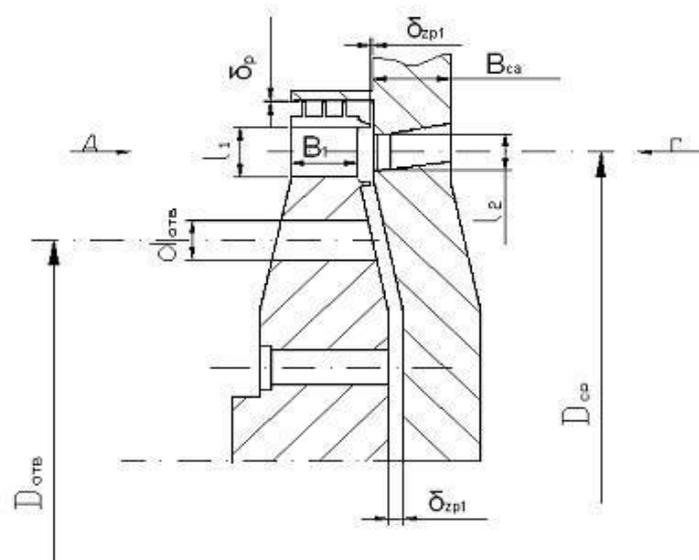


Рис.4. Конструктивная схема осевой турбины

Модельная центробежная турбина была разработана на основании опыта исследования и проектирования таких турбин на кафедре турбинных двигателей и установок. Анализ характеристик приведён в диссертации. Для дальнейшего исследования был принят вариант осевой МРТ, имеющей лучшие прочностные характеристики.

### Третья глава

Для исследования особенностей структуры потока в проточной части турбинной ступени применён метод численного моделирования. Он позволяет получить информацию о структуре поля потока в ступени в дополнении к данным, полученным в натуральных экспериментах или в экспериментах на

модельной турбине. Необходимость применения этого метода в данной работе обусловлена особенностями исследуемой проточной части, которая имеет малые геометрические размеры и не даёт возможности использовать в эксперименте измерительные зонды для детального исследования потока. Метод численного моделирования используется в дополнение к аэродинамическому эксперименту, что позволит уменьшить затраты времени и средств за счёт сокращения количества экспериментов на модельной турбине. На основании детальных данных о структуре потока в ступени, полученных методом численного моделирования, представляется возможным судить об эффективности рабочего процесса в ступени и разработать способы его совершенствования.

В основе метода численного моделирования используется система уравнений, описывающих движение потока газа. В эту систему входят уравнения сохранения количества движения, энергии и неразрывности. Кроме того, используется уравнение состояния газа. Учитывается также вязкость газа и турбулентный характер течения. В процессе численного моделирования эта система уравнений решается методом конечных объёмов с учётом заданных граничных условий.

В настоящее время имеются значительные успехи в разработке численных методов решения уравнений, описывающих движение вязкого турбулентного потока газа. Применение этих методов на практике требует квалифицированного подхода и проверки достоверности полученных расчетных данных путем сопоставления их с экспериментальными данными.

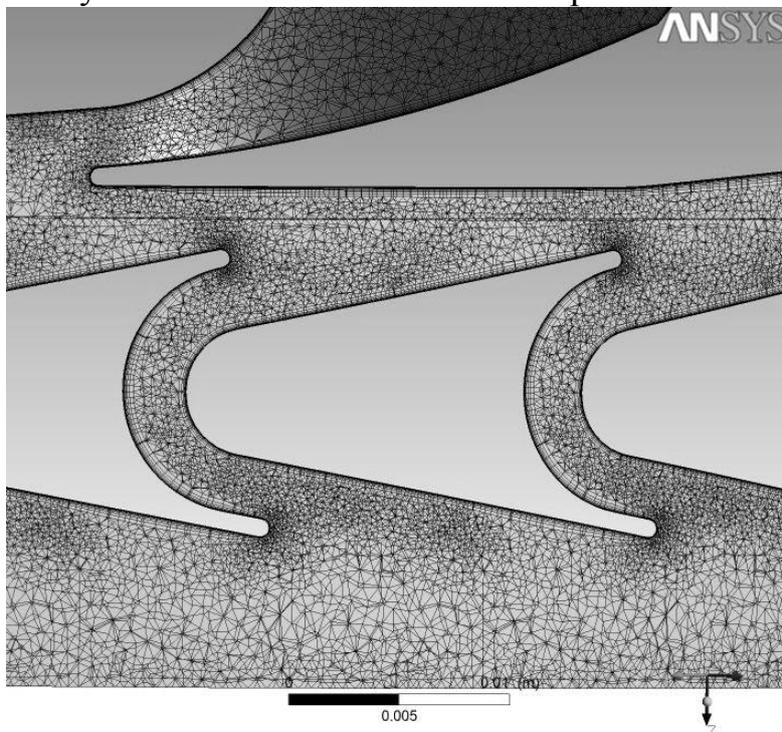


Рис.5. Фрагмент расчётной сетки

По итогам главы можно сделать следующие выводы:

На выходе из соплового аппарата поле потока имеет сложную пространственную структуру. Значительная неравномерность по шагу



Основным элементом установки является нагрузочное устройство - индукторный тормоз, позволяющий проводить исследования турбин в широком диапазоне изменения мощности и частоты вращения.

Для исключения потерь мощности на трение в подшипниках вала применяется схема с взвешиванием подшипников вала в подшипниках корпуса тормоза (схема “подшипник в подшипнике”). Применение моментомера III позволяет разделить потери кинетической энергии в исследуемой турбинной ступени. Данная система позволяет полностью разделить потери кинетической энергии в сопловом аппарате, в рабочем колесе и потери с выходной скоростью. Расчётные и экспериментальные характеристики подробно приведены в диссертации.

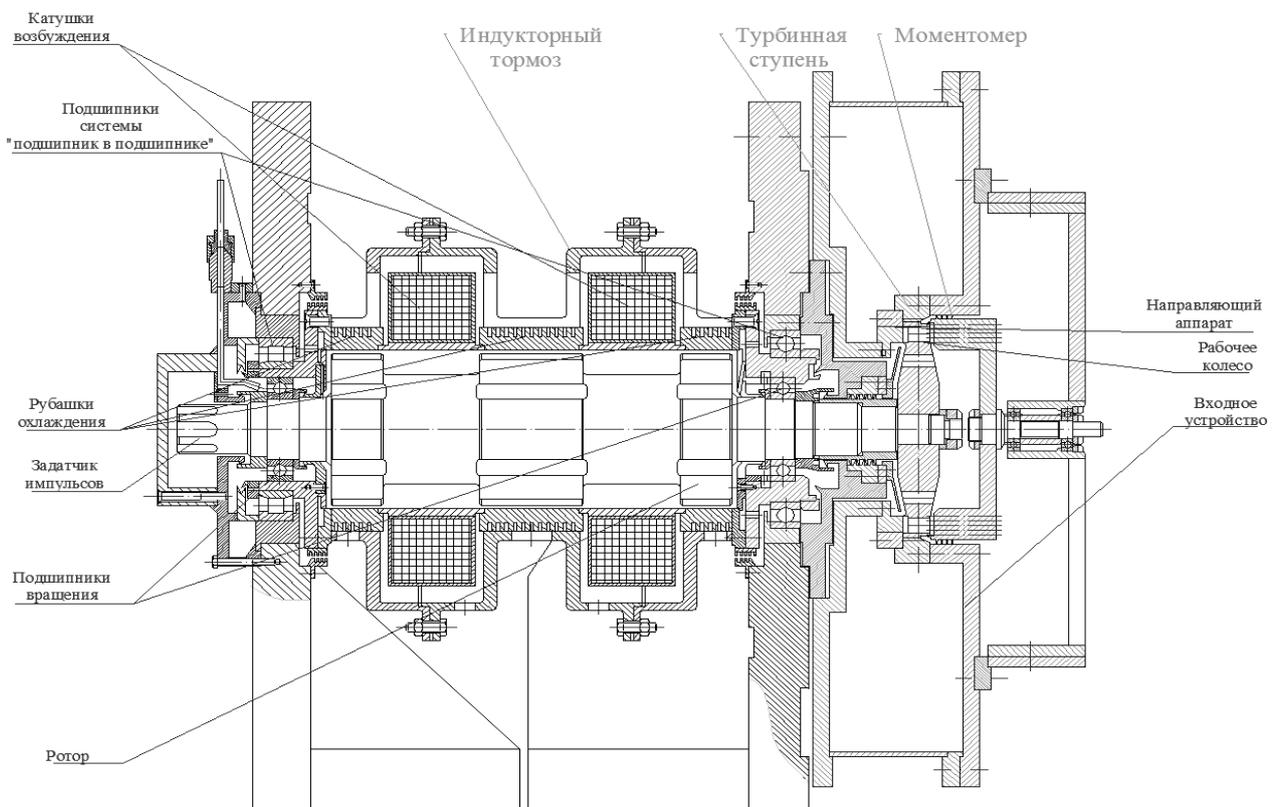


Рис.7. Продольный разрез экспериментальной высокооборотной установки для испытания модельных малорасходных центробежных турбин

**В пятой главе** приводятся результаты экспериментального исследования модельной турбины и их сравнение с расчетными данными.

Внутренний КПД ступени:  $\eta = N_1 / (G_\Sigma h_0^*)$ . Эффективная мощность, развиваемая турбиной:  $N_1 = M_1 \omega_1, [\text{Вт}]$ . Термодинамическая степень реактивности:  $\rho_T = [(p_1 / p_0^*)^{k-1/k} - (p_2 / p_0^*)^{k-1/k}] / [1 - (p_2 / p_0^*)^{k-1/k}]$ .  
Остальные характеристики определялись решением уравнений моментов, измеренных в ходе эксперимента.

Таблица 2

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
1.	$N_B$	кВт	0,09	0,3
2.	$G$	кг/с	0,009	1,7
3.	$H_0^*$	кДж/кг	0,35	0,23
4.	$\eta_B$	%	0,015	1,63

Для увеличения точности величин, дающих наибольшую погрешность, применяется многократное повторение замеров значений определяющих параметров, во всем диапазоне изменения  $\pi_T$ ,  $u/C_0$ ,  $N_B$ .

Основные результаты испытаний приводятся ниже:

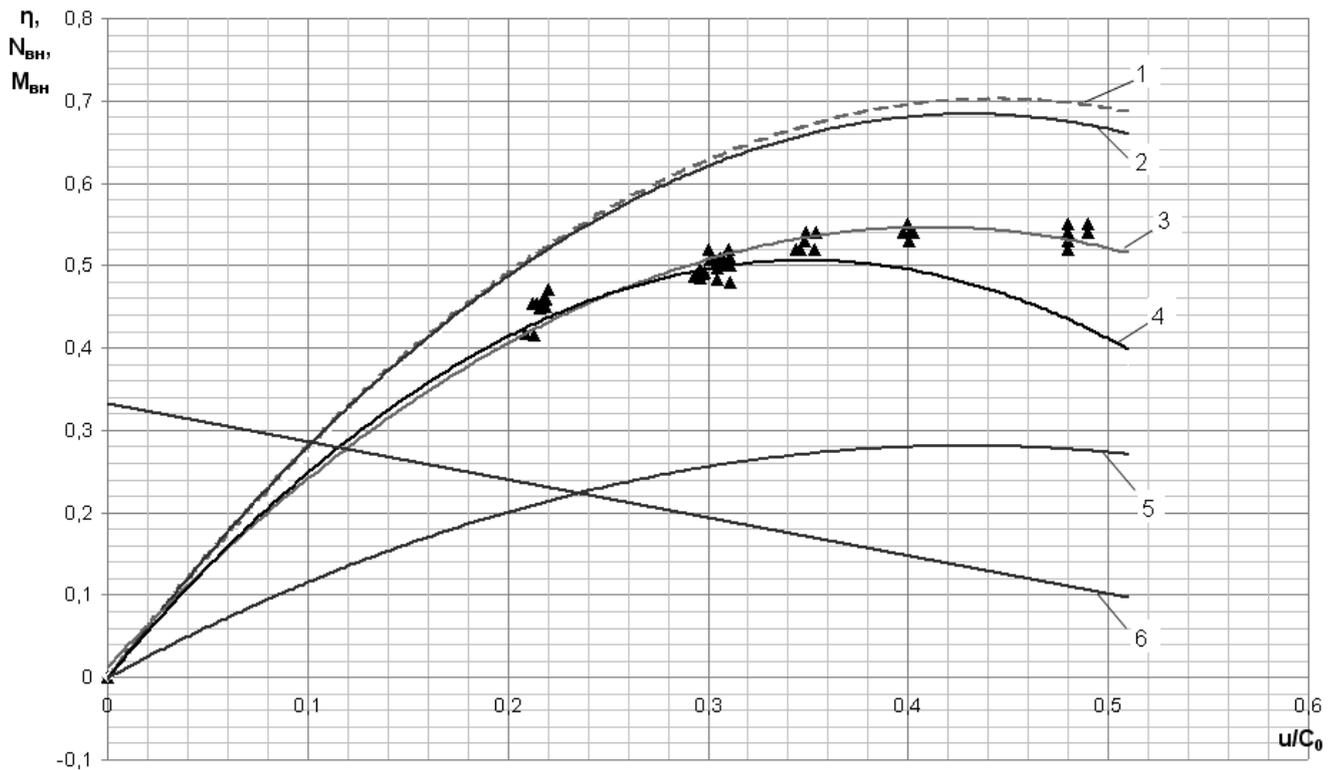


Рис. 8. Зависимости основных характеристик турбинной ступени ЛПИ МДГ-20 в зависимости от  $(u/C_0)$

1 – расчётный окружной КПД для РК с бандажом; 2 – расчётный внутренний КПД для РК с бандажом; 3 – экспериментальный внутренний КПД для колеса без бандаж; 4 – расчётный внутренний КПД (ANSYS); 5 – расчётная внутренняя мощность для РК с бандажом; 6 – расчётный момент для РК с бандажом

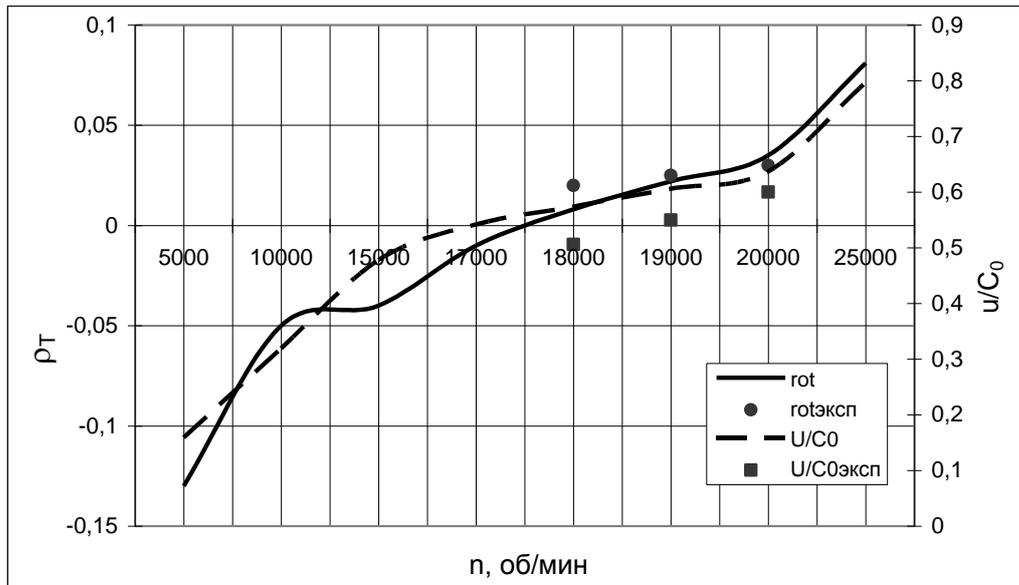


Рис.9. Зависимость степени реактивности  $\rho_T$  и характеристического числа  $u/C_0$  от частоты вращения ротора при  $P_0=0,13$  МПа и  $P_2=0,1013$  МПа

Как видно из рис. 9, экспериментальные данные характеристического числа  $u/C_0$  и степени реактивности  $\rho_T$  очень близки к расчётным данным. В составе ступени ЛПИ на стенде применялось осевое колесо без бандажной полки, что снизило КПД турбины по отношению к расчёту на 10%.

Приведенные результаты исследований, их выводы и рекомендации следует учитывать при проектировании, создании и натурных исследованиях микротурбодетандерных генераторов, приведённых на рис. 10 и рис.11.

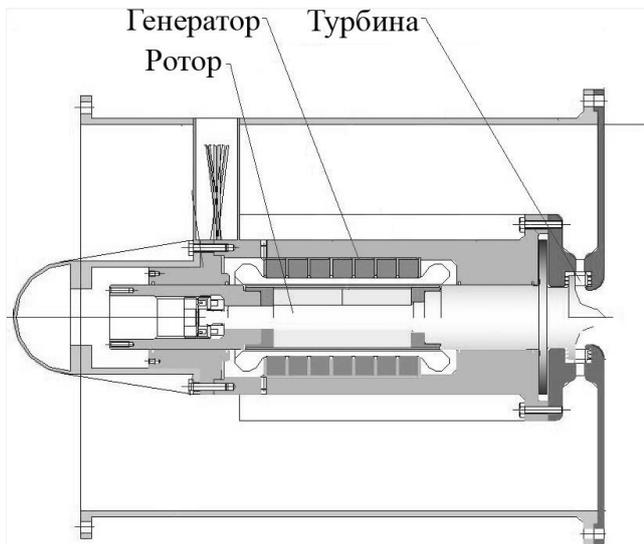


Рис. 10. Конструктивная схема центробежной турбины

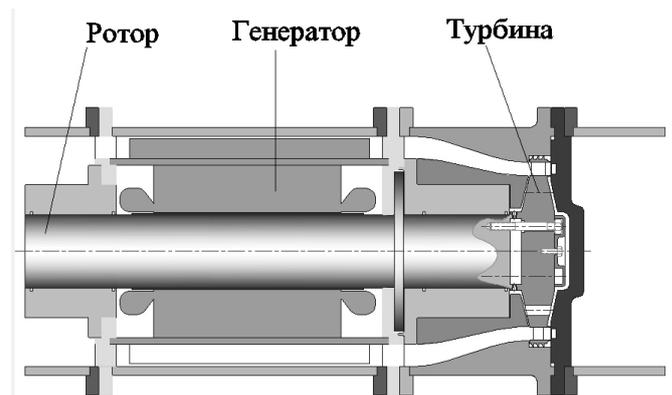


Рис. 11. Конструктивная схема осевой турбины

### **Заключение**

1. В результате выполненной диссертационной работы разработаны и экспериментально исследованы модельные турбины конструкции ЛПИ для применения их в микротурбодетандерных на следующие модельные параметры  $P_0=0,247$  МПа,  $T_0=320$  К,  $n=26100$  об/мин,  $G=0,067$  кг/с. Уровень КПД в варианте МРТ с РК без бандажа составил 59% при  $u/C_0=0.45$ , а с РК с бандажом 67.5% при  $u/C_0=0.455$ .
2. Выполнено моделирование параметров натуральных микротурбодетандерных генераторов на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ для их исследования на воздухе на стендах СПбГПУ.
3. Разработка математической модели расчёта сверхзвуковых одноступенчатых турбин конструкции ЛПИ для диапазона изменения параметров  $\pi_T = 2...5$ ,  $M_{C1}=1...2$ ,  $T_0 = 288...350$ К.
4. Проведён численный эксперимент в трёхмерной постановке модельной малорасходной турбины конструкции ЛПИ с целью изучения физической картины течения рабочего тела в проточной части и оценки характеристик малорасходной турбины.
5. Выполнено обобщение экспериментальных характеристик исследованных МРТ разного типа с целью использования таких турбин в микротурбодетандерных генераторах.
6. Разработаны рекомендации по проектированию турбин для микротурбодетандерного генератора на основе малорасходных турбин конструкции ЛПИ
7. Создана экспериментальная база и методика проведения и обработки экспериментальных данных для исследования малорасходных турбин конструкции ЛПИ для повышения их экономичности и надёжности в составе микротурбодетандерных генераторов.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

**в рецензируемых журналах, входящих в ВАК РФ:**

1. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Забелин Н.А. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – №4. – С.41-51;
2. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Забелин Н.А., Харисов И.С. Методика проведения экспериментальных исследований ступеней турбоустановок малой мощности на стендах СПбГПУ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – №1. – С.119-122;

**в других изданиях:**

3. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Забелин Н.А., Разработка автономного локального источника электрической и тепловой энергии на природном газе, предназначенного для электро- и теплоснабжения ГРС, XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С.41-42;

4. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Беседин С.Н., Миронов В.В., Результаты испытаний модельной камеры сгорания для газотурбинного двигателя мощностью 100 кВт, XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - С.51-53;
5. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Забелин Н.А., Миронов В.В., Разработка автономного локального источника электрической энергии на природном газе электрической мощностью 26 кВт применительно к требованиям ГТС ООО «Лентрансгаз», XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - С.53-54;
6. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Раков С.Г. Беседин С.Н., Миронов В.В., Модернизация экспериментальных установок для исследования малорасходных турбин автономных источников электрической энергии малой мощности», XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 57-59;
7. Матвеев Ю.В., Рассохин В.А., Раков Г.Л., Забелин Н.А., Стенд для исследования высокооборотных модельных ступеней малорасходных турбин конструкции ЛПИ», Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке : материалы XVII Междунар. науч.-метод. конф. 11-12 февраля 2010 года, Санкт-Петербург. Т.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С.262-263.