

На правах рукописи

УДК 621.372.01

*Фершалов Юрий Яковлевич*

Фершалов Юрий Яковлевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ОСЕВЫХ  
МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

Специальность 05.08.05

Судовые энергетические установки и их элементы (главные и  
вспомогательные)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владивосток

1999

На правах рукописи

Фершалов Юрий Яковлевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ОСЕВЫХ  
МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

Специальность 05.08.05

Судовые энергетические установки и их элементы (главные и  
вспомогательные)



Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владивосток

1999

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете и в Дальневосточном государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Рассохин В.А.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Якубовский Ю.В.

кандидат технических наук, доцент Симашов Р.Р.

Ведущая организация: научно-исследовательский институт "МОРТЕПЛОТЕХНИКА", Санкт-Петербург

Защита состоится 10 февраля 2000 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного Совета Д 064.01.01 в Дальневосточном государственном техническом университете по адресу: 690600 г. Владивосток, Пушкинская 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дальневосточного государственного технического университета

Автореферат разослан 25 декабря 1999 года

Ученый секретарь диссертационного Совета  
канд. техн. наук, доцент



Борисов Е.К.

0455.3-042.3-011.4,0 + 0459.3-042.3-011.4,0

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

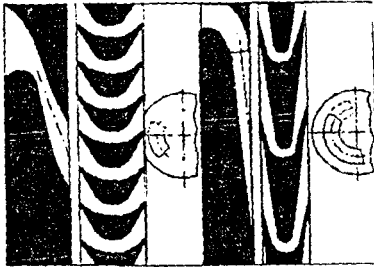
Актуальность проблемы. Проблема создания высокоэффективных двигателей представляет собой задачу повышенной актуальности, особенно в условиях роста цен на энергоресурсы. В значительной мере это относится к малорасходным турбинам (МРТ). Такие турбины широко применяются в судостроении как вспомогательные двигатели, а также – в качестве главных двигателей автономных морских подводных аппаратов. Кроме того, МРТ используют в составе системы жизнеобеспечения для аппаратов, применяемых в авиации и космонавтике, в мобильных электростанциях и т.п. То есть, в тех областях техники, где жесткое требование мобильности и массогабаритные показатели ограничивают расход рабочего тела (РТ). При использовании традиционных турбин, ограниченный расход РТ приводит к необходимости применять частичный выпуск. К.п.д. турбинного привода при этом существенно снижается. Для такой области транспортной энергетики, как морские надводные и подводные аппараты, эффективность теплового цикла энергоустановки определяет важнейший показатель – автономность аппарата.

Вышеуказанная область применения турбоприводов предопределяет необходимость получения высоких удельных мощностей при ограниченных массогабаритных показателях турбоагрегата, что требует больших перепадов энтальпий при сравнительно малых расходах РТ. При таких параметрах, как правило, используются сверхзвуковые МРТ. Условия эксплуатации предъявляют к ним ряд требований: минимальные массогабаритные показатели при высокой удельной мощности; пониженные частоты вращения ротора; возможность работы в широком диапазоне изменения мощности и частоты вращения; надежность и др. Поэтому МРТ характеризуются рядом особенностей: малая относительная высота лопаток соплочного аппарата (СА) и рабочего колеса (РК), а также большие относительные величины шероховатости поверхностей и длин, подводящих и отводящих каналов.

кромки, зазоры. Все это вызывает образование относительно "толстого" пограничного слоя и повышенную неравномерность потока, которые приводят к резкому снижению к.п.д. турбины. При использовании традиционных МРТ в дополнение к перечисленным потерям энергии, добавляются потери, обусловленные парциальностью. По данным МАИ и КуАИ, снижение степени парциальности  $\beta$  от 1 до 0,15 у осевых МРТ приводит к падению к.п.д. с 75% до уровня менее 50%.

Один из путей решения проблемы, связанной с парциальностью ( $\beta$ ), — использование высокоперепадных МРТ с большим углом поворота потока в рабочих колесах конструкции ЛПИ (Ленинградский политехнический институт), авторское свидетельство № 857512, 1981 г.) (рис.1) и сопловыми аппаратами с малыми конструктивными углами выхода потока ( $\alpha_{1K}$ ), благодаря чему малорасходные турбины выполняются с полным впуском рабочего тела.

Использование таких МРТ предъявляет повышенные требования к сопловому



а) традиционная б) МРТ ЛПИ

Рис.1 Схемы МРТ

так как его эффективность оказывает наибольшее влияние на к.п.д. ступени. Точное уменьшение коэффициента скорости ( $\varphi$ ) на 1% приводит к падению к.п.д. ступени примерно на 2%. Кроме того, неверная оценка аэродинамических свойств соплового аппарата влечет за собой ошибочное профилирование каналов

что еще больше снижает к.п.д. турбины.

Данная работа посвящена повышению эффективности МРТ с большим углом поворота потока для совершенствования их характеристик (высокий к.п.д. и пусковой момент, снижение оптимальной частоты вращения ротора) на основе создания высокоэффективных СА с  $\alpha_{1K} \leq 9^\circ$ . При этом достигается расширение областей применения МРТ за счет повышения их экономичности и повышение автономности морских подводных и надводных аппаратов.

благодаря уменьшению расхода топлива в связи с увеличением к.п.д. турбины; уменьшение негативного влияния шума МРТ при ликвидации его источника на неактивной дуге РК; увеличение надежности турбины за счет равномерно распределенной осевой нагрузки на РК и, как следствие, на подшипники.

**Цель работы:** повышение эффективности сверхзвуковых осевых малорасходных турбин с большим углом поворота потока, на основе совершенствования конструкции и экспериментальных исследований сопловых аппаратов с малым конструктивным углом выхода потока.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

разработаны и практически реализованы конструкции СА для МРТ с  $\alpha_{1K} = 5^0; 7^0; 9^0$  и  $\bar{f} = f_{ВЫХ} / f_{КР} = 1; 1,48; 2,82$ , которые обладают более низким уровнем потерь кинетической энергии в сравнении с ранее существующими;

разработаны методики экспериментального определения внутреннего к.п.д. МРТ и характеристик СА, работающих в составе турбинной ступени;

разработаны и практически реализованы установки и стенды для проведения экспериментальных исследований сопловых аппаратов и МРТ;

экспериментально определены численные значения интегральных характеристик разработанных сопловых аппаратов и осевых сверхзвуковых малорасходных ступеней конструкции ЛПИ (диапазон варьирования геометрическими и режимными параметрами:  $\alpha_{1K} = 5^0 \dots 9^0$ ,  $\bar{f} = 1; 1,48; 2,82$ ,

$u / C_0 = 0 \dots 0,4$ ,  $\pi_T = P_0^* / P_2 = 2 \dots 30$ , число Маха ( $M_{C_{II}}$ ) – 1,1 ... 3,0);

проведён сравнительный анализ экспериментальных данных по СА и МРТ, полученных как в результате данной работы, так и другими авторами;

определены и оценены значения параметров нелинейных регрессионных моделей для вычисления интегральных характеристик СА, имеющих  $\alpha_{1K} = 5^0 \dots 9^0$  и прямолинейный разгонный участок (при  $u / C_0 = 0 \dots 0,2$ );

определены и оценены значения параметров нелинейной регрессионной модели для вычисления к.п.д. малорасходных турбин конструкции ЛПИ с предложенным конструктивным выполнением СА в исследованном диапазоне;

разработан метод профилирования сверхзвуковых сопел для МРТ;

разработана методика определения значений режимных и геометрических факторов СА, предлагаемой конструкции, для получения максимально достижимого значения  $\varphi$  в исследованном диапазоне;

разработана методика определения значений режимных и геометрических факторов модельных МРТ с предложенным СА для получения максимально достижимого значения к.п.д. в исследованном диапазоне;

рекомендованы пути дальнейшего совершенствования МРТ.

**Научную новизну** диссертационной работы составляют:

результаты экспериментальных исследований ступеней МРТ;

экспериментально полученные интегральные характеристики предложенных сопловых аппаратов для МРТ конструкции ЛПИ в интервале варьирования исследуемых факторов:  $\alpha_{1K} = 5^0 \dots 9^0$ , число Маха 1,1 ... 3;

результаты исследования влияния вращения РК на характеристики СА при сверхзвуковых скоростях рабочего тела (РТ) в диапазоне  $u / C_0 = 0 \dots 0,2$ ;

регрессионные модели второго порядка предлагаемых СА, работающих в составе сверхзвуковых осевых МРТ с большим углом поворота потока;

регрессионная модель второго порядка сверхзвуковых осевых МРТ с большим углом поворота потока, имеющими в своем составе предлагаемые СА;

экспериментальная методика определения значений интегральных аэродинамических характеристик СА МРТ в условиях работающей ступени;

экспериментальная методика определения внутреннего к.п.д. ступени;

результаты численного эксперимента;

метод профилирования сопловых аппаратов для МРТ;

конструкция сверхзвуковых СА для МРТ конструкции ЛПИ с более низким уровнем потерь кинетической энергии относительно существующих.

**Объект исследований:** МРТ с углом поворота потока больше  $150^\circ$ .

**Предмет исследований:** СА с  $\alpha_{1K} = 5^\circ \dots 9^\circ$  и  $\bar{f} = 1 \dots 2,82$ .

**Достоверность и обоснованность** результатов экспериментальных исследований, положений и выводов обеспечивается: использованием основных законов сохранения энергии и массы; соблюдением условий подобия при проведении экспериментов; оценкой погрешностей; проведением сравнительных экспериментов; экспериментальной проверкой полученного к.п.д. методом, применяемым ранее другими авторами: сравнение результатов исследований с данными других авторов; проверкой регрессионных моделей на адекватность; накопленным научным и практическим опытом при создании МРТ; применением современных методов решения экстремальных задач.

**Практическая ценность работы:**

разработаны *методы профилирования* новых конструкций сопловых аппаратов, позволяющих повысить к.п.д. малорасходных турбин;

разработана *методика*, алгоритм расчета и его программная реализация, позволяющие прогнозировать эффективность предложенных СА и определять параметры потока РТ за ними, а также проводить оптимизационные расчеты;

разработана *методика*, алгоритм расчета и его программная реализация, позволяющие проводить численный эксперимент для МРТ конструкции ЛПИ с предложенными СА, а также определять значения режимных и геометрических параметров этих турбин для достижения максимального значения к.п.д.;

создана *конструкция СА*, позволяющая повысить к.п.д. МРТ.

**Личный вклад автора.** При непосредственном участии автора проводились: постановка задач исследования; проектирование конструкции и изготовление с вводом в эксплуатацию экспериментальных стендов и установок; конструирование, изготовление СА и МРТ; разработка методики



проведения экспериментальных исследований, обработки и анализа полученных данных. *Лично автором* выполнены: подготовка и проведение экспериментальных исследований; анализ результатов, которые приведены в диссертации; разработка регрессионных моделей для СА и МРТ и проверка их адекватности; проведение численного эксперимента и анализа его результатов; оптимизационные расчеты; разработка рекомендаций для выбора конструкции СА; предложения по дальнейшему исследованию малорасходных турбин.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждены: на Всесоюзной научной конференции “Газотурбинные и комбинированные установки” (г.Москва, 1987г.); на межвузовской конференции (г.Владивосток, 1985г.); на XXX юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию Дальневосточного политехнического института (г.Владивосток, 1988г.); на семинаре факультета корабельной энергетики морского института ДВГТУ (г.Владивосток, 1999); на научно-технических семинарах кафедры “Энергетическое и атомное турбиностроение и авиационные двигатели” СПбГТУ (г.Санкт - Петербург в 1987 - 1991, 1998, 1999г.).

**Реализация результатов работы:** пять актов внедрения.

**Публикация работ.** Основные результаты диссертационной работы, помимо научно-технических докладов, опубликованы в пяти печатных работах и научно - техническом отчете.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований СА и МРТ.
2. Регрессионные модели предлагаемых сопловых аппаратов.
3. Регрессионные модели исследованных малорасходных турбин.
4. Результаты оптимизационных исследований интегральных характеристик сопловых аппаратов, предлагаемой конструкции, для малорасходных турбин, которые получены экспериментальным путём.
5. Результаты оптимизационных исследований МРТ с СА предлагаемой конструкции, полученные на основе экспериментальных данных.

6. Методика профилирования сверхзвуковых СА, у которых разгонные участки прямолинейны и без изломов. Проекция средней линии разгонного участка на плоскость СА расположена по касательной к окружности, образованной средним диаметром турбинной ступени.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы: 153 страницы, из них 55 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 128 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы. На основании анализа условий эксплуатации МРТ определены основные требования, предъявляемые к турбинам такого класса и их особенности обуславливающие, как правило, низкую эффективность МРТ. Показано, что для уменьшения потерь кинетической энергии, связанных с парциальностью, необходимо применять МРТ конструкции ЛПИ. Выполнен краткий анализ состояния рассматриваемой проблемы и показаны возможные пути совершенствования МРТ. Определен подход к исследованию МРТ. Изложена научная новизна работы.

**В первой главе** подробно рассмотрены вопросы, связанные с особенностями условий работы МРТ, которые приводят к снижению их эффективности: малые размеры проточных частей и парциальный подвод РТ; низкие значения характеристического числа; сверхзвуковые скорости РТ в проточной части РК; повышенные относительные погрешности при изготовлении ступеней из-за малых размеров лопаточных аппаратов. Анализ воздействия отдельных элементов МРТ на ее эффективность показал, что основное влияние на к.п.д. оказывает СА. Благодаря тому, что применение МРТ конструкции ЛПИ сводит к минимуму потери кинетической энергии, связанных с парциальностью ступени, то первоочередной задачей для повышения эффективности МРТ было совершенствование сопел для сопловых аппаратов.

Для выбора конструкции сопел для сверхзвуковых МРТ с большим углом поворота потока был проведен анализ работ, посвященных СА, применительно к МРТ. Он показал, что потери кинетической энергии в осесимметричных соплах существенно ниже, чем в соплах прямоугольного сечения. Однако на практике осесимметричные сопла не применяют с конструктивным углом выхода потока меньше  $12^\circ$  из-за вытянутого эллипса на выходе. Это приводит к необходимости снижать степень впуска рабочего тела. В связи с этим в МРТ широко применяются сопла с прямоугольным сечением (рис.2).

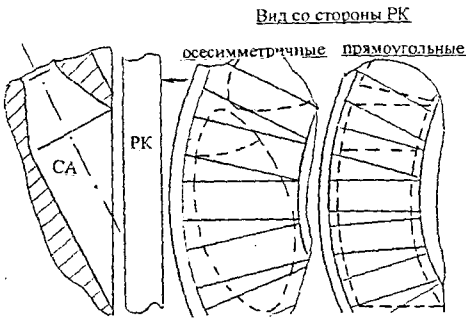


Рис.2 Выходные участки СА

Для снижения потерь кинетической энергии, связанных с парциальностью МРТ, была обоснована целесообразность применения СА с соплами прямоугольного сечения и с  $\alpha_{1K} \leq 9^\circ$  в составе МРТ конструкции ЛПИ, что позволило выполнять СА со степенью парциальности близкой к единице.

Существующие СА для МРТ конструкции ЛПИ обладают низкой эффективностью  $\varphi \leq 0,92$ . Это связано с концевыми потерями кинетической энергии и неравномерным распределением эпюры скорости потока при переходе к сверхзвуковой скорости и при выходе его в косой срез. Автором были разработаны мероприятия по устранению этого недостатка путем изменения конструкции разгонного участка сопел.

Существует ряд подходов к исследованию как МРТ, так и их элементов: теоретический, основанный на численном решении уравнений Навье-Стокса который, несмотря на свою универсальность и перспективность, из-за ряда допущений дает неприемлемо большую погрешность; "полуэмпирические" методики, которые вообще неприемлемы для исследований МРТ из-за

невозможности разделения потерь на составляющие в отличие от полноразмерных турбин; методики, основанные на обобщении экспериментальных данных разных авторов методами математической статистики, использование которых затруднено тем, что эксперименты проводились при разных условиях и с разной точностью, зачастую эти данные вообще отсутствуют, поэтому к таким моделям можно относиться как к условным, отражающим лишь качественный характер изучаемого явления. На основании вышесказанного, в данной работе был использован экспериментальной метод, основанный на математической теории планирования эксперимента. Этот метод обладает рядом преимуществ перед вышеперечисленными методами: устанавливает строгое соответствие между требуемой точностью результатов и числом опытов; результаты представлены в виде регрессионной модели второй степени, т.е. в форме наиболее удобной для использования при проектировании МРТ, а так же для проведения численного эксперимента и оптимизационных расчетов; форма представления модели позволяет совершенствовать ее при получении новых данных.

Из-за большой погрешности полученных методом траверсирования результатов, при определении эпюры распределения сверхзвуковых скоростей потока в каналах малого сечения, какие имеют МРТ, установлена необходимость создания стенда и установки для проведения экспериментальных исследований по определению интегральных, а не локальных характеристик МРТ и СА работающего в составе ступени.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведено описание разработанного и созданного автором экспериментального стенда (рис.3).

Технические характеристики стенда позволяют проводить экспериментальные исследования турбин в следующих пределах: частота вращения ротора до  $500 \text{ с}^{-1}$ ; давление РТ на входе в СА до 0,8 МПа; диаметр



КОВ – колесо с осевым выходом; ИТ – индукторный тормоз;  
 ПСЧ-5 – датчики силы

Рис. 3 Структурная схема стенда

исследуемых ступеней – 100...250 мм; степень расширения РТ в ступени до 50; давление на выходе из МРТ до 0,015 МПа; рабочее тело – воздух; максимальная относительная погрешность получаемых результатов меньше 3%. В нем для повышения достоверности экспериментальных данных, применены две независимые измерительные системы: - колесо, которое обеспечивает осевой выход РТ из него (КОВ) и взвешенный СА, имеющие одну степень свободы; индукторный тормоз (ИТ). Стенд позволяет получать интегральные характеристики СА и МРТ посредством измерения момента количества движения потока РТ за СА и за РК, а также на ИТ во время работы ступени.

Анализ показал, что интегральные характеристики СА и МРТ, в области оптимальных значений, являются функциями второго порядка. Поэтому программа эксперимента опиралась на трехуровневые планы Бокса-Бенкена для получения регрессионных моделей второго порядка для СА и МРТ.

На основании плана эксперимента были разработаны и изготовлены СА (табл.1, рис.4) - с  $\alpha_{1K} = 5^0; 7^0; 9^0$  с  $\bar{f} = f_{ВЫХ} / f_{КР} = 1; 1,48; 2,82$ . Кроме этого все СА имели предложенную автором конструкцию разгонного участка.

РК проектировались на основе результатов исследований, проведенных

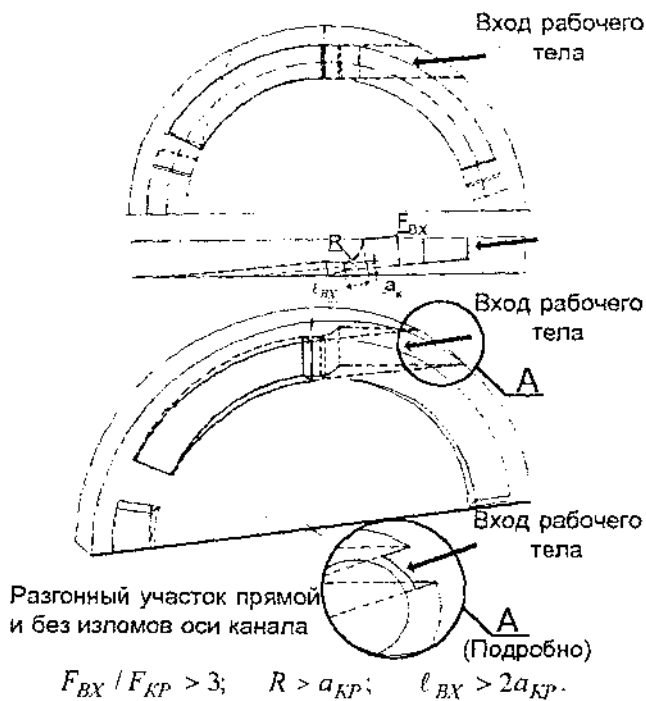


Рис. 4 Принципиальная конструкция предложенных СА

на плоских решетках, в СПбГТУ для МРТ конструкции ЛПИ (табл. 1, рис. 5).

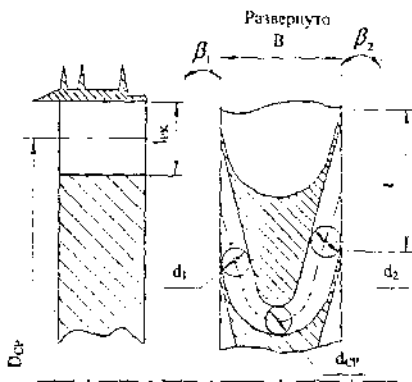


Рис. 5 Конструкция модельных РК

Таблица 1

## Характеристики испытанных СА и РК

Номера	Модельные сопловые аппараты									Модельные рабочие колеса			
	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	1-3	2-3	3-3	1	2	3	
Диаметр средний, мм	170									170			
Высота лопатки, мм	7									11,5			
Кол-во лопаток, шт.	6									26			
Угол входа, град.	90									8,1	11,2	14,1	
Угол выхода, град.	5	7	9	5	7	9	5	7	9	8,4	12,5	15,3	
Шаг, мм	89									20,5			
Ширина, мм	20									18,2			
Диаметры вписанных окружностей (рис.5), мм	$d_1$	-									2,4	3,5	4,5
	$d_{CP}$	-									2,2	3,3	4,2
	$d_2$	-									2,6	3,8	4,9
Отношение площади критического сечения к выходному сечению	2,82			1,48			1,00			1,18			
Хорда, мм	90	90	84	93	90	78	104	84	78	18,8			

Порядок проведения экспериментальных исследований опирался на план Бокса-Бенкина для трех независимых факторов: для СА -  $u/C_0, \alpha_{1K}, M_{CII}$  и для МРТ -  $u/C_0, \alpha_{1K}, \pi_T$ . Исследования проводились при одинаковых  $\bar{f}$ .

Методика обработки опытных данных основывалась на законах сохранения момента количества движения, полной энергии и массы. Обработка результатов эксперимента заканчивалась аппроксимацией истинной гиперповерхности полиномиальной моделью второго порядка. Данные для получения модели брались на нижней границе доверительного интервала.

**В третьей главе** приведены результаты исследований экспериментально полученных интегральных характеристик СА предлагаемой конструкции и к.п.д. ступеней МРТ с большим углом поворота потока, имеющие в своем составе эти СА. Исследования показали, что коэффициент расхода сопловых

аппаратов ( $M_p$ ) по всем диапазонам изменения режимных параметров остается неизменным (0,96). Это согласуется с данными других авторов по оценке  $M_p$  сверхзвуковых СА в области автомодельности. Оценка численного значения коэффициента расхода подтверждает, что предложенная конструкция входного участка СА имеет аэродинамические характеристики более совершенные, чем ранее применяемая в прямоугольных соплах с малым углом выхода потока.

Экспериментально доказана возможность создания СА для МРТ конструкции ЛПИ при низком уровне потерь кинетической энергии ( $\zeta \leq 0,09$ ) за счет существенного снижения в них вторичных течений и равномерном распределении эпюры скоростей в разгонном участке. Ранее применяемые СА в МРТ конструкции ЛПИ имеют уровень этих потерь выше ( $\zeta \geq 0,1$ ).

Статический эксперимент показал, что из-за воздействия на поток РТ скачков уплотнения исходящих от кромок РК, при оптимальных параметрах суживающиеся СА имеют более высокое значение  $\varphi$ , чем расширяющиеся.

На основании экспериментальных данных построена регрессионная модель осевых сопловых аппаратов для оценочных и оптимизационных расчетов в диапазоне параметров, исследованных в эксперименте.

$$\varphi, \alpha_1 = f(M_{Cu}, \bar{u}, \alpha_{1K}) = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j$$

где:  $X_1$  соответствует  $M_{Cu}$  - числу Маха;

$X_2$  соответствует  $\bar{u} = u/C_0$  - характеристическому числу;

$X_3$  соответствует  $\alpha_{1K}$  - конструктивному углу выхода потока.

Апробация полученных регрессионных моделей для СА проводилась по экспериментальным данным, не вошедшим в план проведения экспериментов. Во всех случаях расчетные данные не выходили за границы погрешности





расширения диапазона изменения режимных параметров, в котором  $\varphi$  предложенных СА сохраняет высокое значение (0,90 ... 0,98) при наличии РК, в отличие от ранее применяемых конструкций ( $\varphi=0,86...0,92$ ).

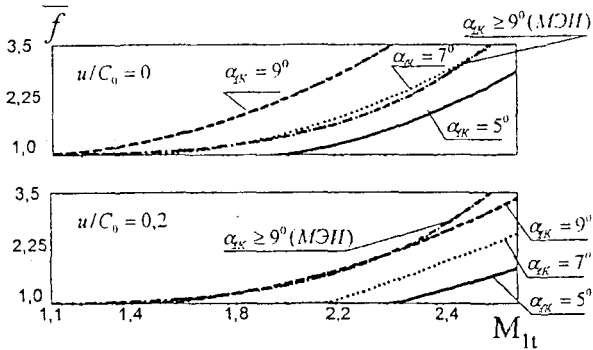


Рис. 7 Рекомендованная степень расширения СА с  $\alpha_{1K}$  не больше  $9^\circ$ .

Установлено, что в осевых сопловых аппаратах с  $\alpha_{1K}$  меньше  $7^\circ$ ,  $\alpha_1$  при увеличении  $u/C_0$  может уменьшаться из-за воздействия скачков уплотнения исходящих от кромок рабочих лопаток, что необходимо учитывать при проектировании рабочих колес (рис.8).

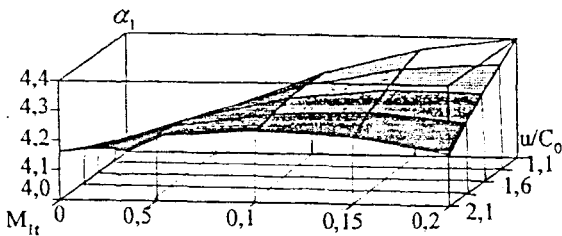


Рис. 8 Угол выхода потока рабочего тела из СА при  $\bar{f} = 1, \alpha_{1K} = 5^\circ$

На основании экспериментальных данных была построена регрессионная модель эффективности осевых МРТ с предложенной конструкцией сопловых аппаратов. Она позволяет проводить оценочные и оптимизационные расчеты ступеней в вышеприведенном интервале изменения параметров:

$$\eta_u = f(\pi_T, \bar{u}, \alpha_{1K}) = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 b_{ij} X_i X_j$$

где:  $X_1$  соответствует  $\pi_T$  - перепаду давления на ступень;

$X_2$  соответствует  $\bar{u} = u/C_0$  - характеристическому числу;

$X_3$  соответствует  $\alpha_{1K}$  - конструктивному углу выхода потока.

Апробация регрессионных моделей МРТ конструкции ЛПИ по результатам экспериментальных исследований показала, что данные, полученные в результате численного эксперимента, лежат в области доверительного интервала (-0,1...+2,3%), что говорит об их адекватности.

Для оценки к.п.д. МРТ с предложенными конструкциями СА выполнены эксперименты при  $\pi_T = 2...30$ . Максимальный, полученный в опытах, к.п.д. составил 62,5% ( $\alpha_{1K} = 9^\circ$ ,  $U/C_0 = 0,41$ ,  $\pi_T = 37,7$ ,  $\bar{f} = 2,82$ ,  $\varepsilon = 0,902$ ) (рис.9). У традиционных осевых малорасходных турбин к.п.д. существенно ниже, при прочих равных условиях, так как уменьшается степень впуска (например, оптимальному значению  $\alpha_{1K} = 20^\circ$  соответствует  $\varepsilon \leq 0,21...0,41$ ).

**В четвертой главе** на основании оптимизационных расчетов и численного эксперимента с последующей экспериментальной проверкой, исследована эффективность предложенных осевых СА и модельных ступеней.

При вращении рабочего колеса происходит смещение оптимума по  $\varphi$  с одновременным уменьшением его значения. В области малых конструктивных

углов выхода потока абсолютное уменьшение  $\varphi$  меньше, чем при больших углах. Это происходит благодаря более сильному направляющему воздействию на поток рабочего тела в косом срезе кромочных скачков уплотнения от РК препятствующих отрыву пограничного слоя. При изменении  $U/C_0$  от 0 до 0.2 сопловых аппаратов с  $\alpha_{1K}=5^\circ$   $\varphi$  падает на 5,5%, а у СА с  $\alpha_{1K}=9^\circ$  на 7,8%.

Малый конструктивный угол выхода потока соплового аппарата определяет более высокую моментную характеристику турбиной ступени, что улучшает пусковые характеристики малорасходной турбины и позволяет ей

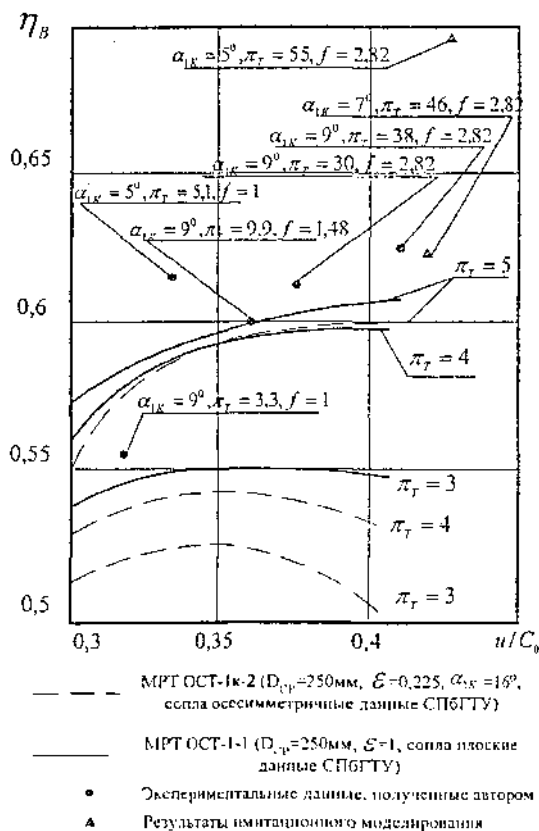


Рис. 9 Сравнение исследованных ступеней с данными СПбГТУ

плавно реагировать на изменение действующей на нее внешней нагрузки.

Осевые сверхзвуковые малорасходные турбины конструкции ЛПИ, выполненные с предложенными сопловыми аппаратами, имеют более высокий уровень к.п.д., чем традиционные такого же класса, благодаря отсутствию в них потерь кинетической энергии связанных с частичным впуском рабочего тела.

Осевые сверхзвуковые МРТ с большим углом поворота потока, имеющие в своем составе СА с прямолинейными разгонными участками, показали более высокий к.п.д. в сравнении с МРТ конструкции ЛПИ, у которых сопловые аппараты выполнены с традиционными входными участками (рис.9). Это произошло благодаря более высокому коэффициенту скорости у сопел с предложенной конструкцией входного участка в составе сверхзвуковых МРТ.

Пологость характеристик коэффициента скорости исследованных сопловых аппаратов, предложенной конструкции и угла выхода потока рабочего тела из них, а также к.п.д. осевых сверхзвуковых малорасходных турбин, имеющих в своем составе эти сопловые аппараты, значительно расширяет их рабочий диапазон. Это качество особенно необходимо конструкциям, функционирующим там, где параметры теплового цикла зависят от внешних условий, или есть необходимость регулирования сверхзвуковых малорасходных турбин в широких диапазонах по мощности и частоте вращения при удовлетворительном уровне к.п.д. установки. Например, в авиации, где перепад давлений на ступень турбины обусловлен высотой и скоростью полета, а в подводной технике – глубиной погружения аппарата.

Несмотря на то, что исследованные осевые сверхзвуковые малорасходные турбины с большим углом поворота потока, имеющие в своем составе сопловые аппараты предложенной конструкции, показали более высокую эффективность, чем традиционные такого же класса, результаты имитационного моделирования ( $\eta_{\text{кпдmax}}=69\%$  см. рис.9) дают основания полагать, что совершенствование проточной части рабочих колёс приведет к дальнейшему повышению коэффициента полезного действия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Созданы и исследованы МРТ с большим углом поворота потока имеющие в своем составе предложенные автором конструкции сопловых аппаратов. Эти сопловые аппараты имеют уровень потерь кинетической энергии меньший, чем у СА, ранее используемых в них ( $\zeta=0,04$  вместо  $\zeta=0,1$ ). Достигнуто это благодаря значительному снижению вторичных течений в соплах и равномерному распределению эпюры скорости потока при переходе от дозвуковой скорости к сверхзвуковой, а так же при выходе потока в косой срез сопла. Кроме того, направляющее воздействие на поток рабочего тела в косом срезе сопла скачков уплотнения, исходящих от кромок рабочего колеса, препятствует отрыву пограничного слоя в рабочем диапазоне, что так же снижаст потери кинетической энергии в сопловом аппарате МРТ.

2. К.п.д. МРТ конструкции ЛПИ, при прочих равных условиях, выше на (3,5...5)%, чем у МРТ конструкции ЛПИ с ранее применяемыми СА. Это произошло за счет повышения коэффициента скорости у сопловых аппаратов предложенной конструкции относительно ранее используемых. Максимально полученная экспериментальным путем эффективность МРТ составила: к.п.д.<sub>max</sub>=61,4% при  $\alpha_{1K} = 5^\circ$  и к.п.д.<sub>max</sub> = 62,5% при  $\alpha_{1K} = 9^\circ$ . Кроме того, у сверхзвуковых МРТ с большим углом поворота потока, благодаря созданным сопловым аппаратам, характер изменения к.п.д. относительно максимального значения при изменении режимных параметров стал более пологим.

3. Определены и оценены значения параметров нелинейных регрессионных моделей для определения интегральных характеристик разработанных сопловых аппаратов в исследованном диапазоне параметров:  $\alpha_{1K} = 5^\circ \dots 9^\circ$ ,  $u/C_0 = 0 \dots 0,2$ ,  $M_{C_{1H}} = 1,1 \dots 3$  при  $\bar{f} = 1; 1,48; 2,82$  и МРТ с большим углом поворота потока, имеющие предложенные СА в своем составе в исследованном диапазоне параметров:  $\alpha_{1K} = 5^\circ \dots 9^\circ$ ,  $u/C_0 = 0 \dots 0,4$ ,  $\pi_T = 2 \dots 30$

при  $\bar{f}=1;1,48;2,82$ . Проверка моделей на адекватность показала, результаты, полученные в процессе численных экспериментов, лежат доверительном интервале  $(-0,1...+2,3)\%$  экспериментальных данных, значения которых взяты по нижней границе доверительного интервала;

4. Разработаны и предложены методики экспериментального определения интегральных характеристик СА в составе ступени и определены внутреннего к.п.д. малорасходных турбин, которые позволяют повысить точность получаемых данных. Методики основаны на определении величин момента количества движения на СА и КОВ, установленным за рабочее колесо. Предлагаемые методики разработаны с целью снижения погрешности эксперимента благодаря значительному уменьшению подвешенных масс являющихся подвижными элементами для замеров. Индукторный тормоз дает возможность сравнивать результаты, полученные независимо от измерительной системы "СА – КОВ". Это делает экспериментальные данные более достоверными, так как они получены от двух независимых измерительных систем и, кроме того, метод, основанный на применении индукторного тормоза в аналогичных исследованиях, ранее был апробирован другими авторами. Эти мероприятия позволили снизить относительную погрешность экспериментальных исследований с 5% до уровня – менее 3%.

5. Спроектированы, созданы и введены в эксплуатацию экспериментальная установка и стенд. Они позволяют проводить исследования малорасходных турбин в следующих пределах: частота вращения ротора  $500 \text{ с}^{-1}$ ; давление рабочего тела на входе в сопловой аппарат до 0,8 МПа; диаметр исследуемых ступеней 100...250 мм; степень расширения рабочего тела в ступени до 50; давление на выходе из ступени до 0,015 МПа; рабочее тело – воздух; максимальная относительная погрешность получаемых результатов не превышала 3% (или меньше  $(\pm 1,8)\%$  абсолютных).

6. Разработан метод профилирования СА для осевых сверхзвуковых МРТ с малым углом выхода потока, по которому практически реализованы

конструкции. Метод основан на проектировании разгонной части сопел прямолинейной и без изломов. Проекция средней линии разгонного участка на плоскость соплового аппарата расположена по касательной к окружности образованной средним диаметром турбинной ступени. Применение сопловых аппаратов, изготовленных по этой методике, позволяет повысить к.п.д. осевых сверхзвуковых малорасходных турбин с большим углом поворота потока рабочего тела за счет повышения коэффициента скорости сопловых аппаратов.

7. Экспериментально получен вывод о положительном обратном влиянии рабочего колеса на сопловой аппарат с малым углом выхода потока, с точки зрения эффективности сверхзвуковой малорасходной турбинной ступени. Это явление связано с направляющим действием рабочей решетки на поток РТ в косом срезе из-за того, что осевая составляющая скорости потока рабочего тела мала и его характеристики более чувствительны к внешним воздействиям в данном направлении. Кроме того, благодаря этому эффективный угол выхода потока РТ из СА может быть равным или меньше конструктивного.

8. Кромочные скачки уплотнения исходящие от рабочих лопаток, воздействуя на поток рабочего тела из соплового аппарата с малым конструктивным углом выхода потока, не приводят к отрыву пограничного слоя от стенки косого среза сопла. Таким образом, косой срез участвует в процессе расширения струи. Благодаря этому, экспериментально определено, что степень расширения СА с малым углом выхода потока следует выполнять меньше расчетной. Это подтвердилось тем, что в динамическом режиме экспериментальных исследований при характеристическом числе равном 0,2 для сопловых аппаратов с углом выхода 5 градусов до значения числа Маха, вычисленного по теоретическим параметрам, равным 2,41, не найдено такое значение числа Маха при котором следовало бы изготавливать расширяющийся сопловой аппарат. Для СА с углом выхода 9 градусов до значения числа Маха равным 1,58 более эффективно работает суживающийся сопловой аппарат. А для сопловых аппаратов с углом выхода 7 градусов



значение числа Маха, при котором надо применять сопловой аппарат расширяющимися соплами, отодвинулось до значения числа Маха - 2.15.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Фершалов Ю.Я. Экспериментальное исследование турбинных ступеней на основе теории планирования эксперимента // Тезисы докладов XXX Юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию Дальневосточного политехнического института.-Владивосток, 1988.- С.136-137
2. Рассохин В.А., Раков Г.Л., Никитенко Е.Л., Фершалов Ю.Я., Смирнов К.А. Экспериментальный стенд для исследований малорасходных турбин при высоких степенях расширения // Информ. Листок ЛенЦНТИ. - Л., 1990. № 423-90. С.4
3. Исследования характеристик и совершенствование сверхзвуковых решеток профилей, применяемых для унифицированных двухвенечных ступеней турбоприводов судовых механизмов // Отчет о НИР (заключительный). Раздел 5/ЛПИ; Руководитель И.И.Кириллов. - Шифр темы 304506/002.09.НЗ; № ГР 0185.0078437. - Л., 1986. - С. 42-95.
4. Шемагин А.К., Чехранов С.В., Фершалов Ю.Я. Проектирование и изготовление лопаточных аппаратов малорасходных турбин // Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научной конференции "Газотурбинные и комбинированные установки", 17 - 19 ноября 1987 г.- М., 1987. - С. 22-23.
5. Фершалов Ю.Я.. Сопловые аппараты с малым углом выхода // Труды ДВГТУ. Сер. 3. Кораблестроение и океанотехника. - Владивосток, 1993. Вып.111.-С.75-78.
6. Кончаков Е.И., Бенько А.В., Фершалов Ю.Я. Краевые потери в осевы парциальных микротурбинах // Труды ДВГТУ. Сер.3. Кораблестроение океанотехника. Вып.113. - Владивосток. Издательство ДВГТУ, 1994.-С.15-16.