

На правах рукописи

Фершалов Андрей Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС
СУДОВЫХ ОСЕВЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН**

05.08.05 Судовые энергетические установки и их элементы
(главные и вспомогательные)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Владивосток - 2011

Работа выполнена в Дальневосточном государственном техническом университете (ДВПИ имени В.В. Куйбышева).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Грибиниченко Матвей Валерьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Семенюк Анатолий Васильевич

доктор технических наук, профессор
Добржанский Виталий Георгиевич

Ведущая организация: Дальневосточный научно-исследовательский
проектно-изыскательный и конструкторско-
технологический институт морского флота
(ОАО «ДНИИМФ»), г. Владивосток

Защита состоится "10" июня 2011 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.055.01 при Дальневосточном государственном техническом университете (ДВПИ имени В.В. Куйбышева) по адресу: 690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10, ауд. А-302, тел +7(4232)26-51-18, факс +7(4232)26-69-88.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дальневосточного государственного технического университета.

Автореферат разослан " ____ " мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Борисов Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Энергоресурсы в настоящее время постоянно дорожают, поэтому задача создания высокоэкономичных двигателей различного назначения для судов является актуальной.

Успешное развитие отечественной энергетики, водного и воздушного транспорта, газовой промышленности и других отраслей народного хозяйства в значительной мере зависит от эффективности и надежности тепловых турбомашин. Области применения последних относятся к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (транспортные, авиационные и космические системы; энергетика и энергосбережение), а также к критическим технологиям по направлению "Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем".

В транспортной энергетике, к которой относятся автономные подводные аппараты, для обеспечения требований мобильности и автономности часто приходится создавать турбоприводы с ограниченным расходом рабочего тела (РТ). В таких случаях снижаются площади проходных сечений проточной части турбин и использование в них ступеней с полным подводом РТ требует применения недопустимо малых высот рабочих лопаток (РЛ). Вследствие этого приходится применять сопловые аппараты (СА) с частичным (парциальным) подводом РТ к рабочему колесу (РК). В результате этого появляются дополнительные потери энергии на вентиляцию в зоне неактивной дуги и на краях дуги подвода РТ.

По данным Московского (МАИ) и Куйбышевского (КуАИ) авиационных институтов снижение парциальности от 1,0 до 0,15 в осевых малорасходных турбинах приводит к снижению КПД с 75 до 50%, что негативно сказывается на эффективности энергетической установки в целом, особенно морских подводных аппаратов, так как снижает уровень автономности аппарата, являющийся оценкой целесообразности установки турбины.

Одним из возможных вариантов решения задачи, обусловленной парциальностью, является применение сверхзвуковых (высокоперепадных) малорасходных турбин (МРТ), предложенных И.И. Кирилловым, которые имеют СА с малыми конструктивными углами выхода сопел. Такое решение позволило получить турбины с полным подводом РТ и исключить названные выше потери. Такие конструкции предполагают использование РК, имеющие каналы с большим углом поворота. Последнее приводит к повышению концевых потерь энергии из-за увеличения кривизны канала и, как следствие, повышению градиента давления между выпуклой и вогнутой стенками канала. Вторичные течения потока РТ интенсифицируются и расширяют вихревую зону с повышенными потерями энергии. Поэтому условием применения подобных конструкций является преобладание потерь от парциальности над потерями, связанными с применением РК с большим углом поворота потока.

Для конструирования РК с большим углом поворота проточной части нельзя применять стандартные методики проектирования, так как сохранение приемлемой толщины РК возможно при большом относительном шаге лопаток РК.

Повышение эффективности МРТ требует решения задачи аэродинамического совершенствования и расчетного определения оптимальных геометрических характеристик и режимов работы проточных частей РК с большим углом поворота потока. Исследования в этом направлении на плоских решетках проведены в СПбГПУ Куприяновым О.Е., но РК такой конструкции в составе ступени остались не исследованы.

На эффективность МРТ особенно сильно влияют РК в многоступенчатых турбинах, так как ошибочная оценка аэродинамических свойств РТ за РК приводит к неправильному профилированию следующей ступени.

По данным Калужского турбинного завода увеличение коэффициента скорости в рабочей решетке полноразмерных турбин на 1% повышает мощность ступени на 0,73%.

Вопрос правильного профилирования РК для МРТ является актуальным, так как снижение потерь энергии в РК позволит повысить эффективность работы турбинной ступени.

Цель работы: повышение эффективности сверхзвуковых осевых малорасходных турбин путем оптимизации конструктивных характеристик и режимных параметров проточной части РК.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнены статистический анализ и математическая обработка результатов экспериментальных измерений.
2. Разработаны основы методики, позволяющей по полученным замерам, устанавливать значения коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ.
3. Получены регрессионные математические модели для расчета коэффициента скорости РК МРТ и угла выхода потока РТ из РК в зависимости от режимных параметров и геометрических характеристик.
4. Проведен анализ влияния факторов, вошедших в математические выражения, на целевые функции.
5. Разработаны основы методики для расчета газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК.
6. Проведены оптимизационные вычисления коэффициента скорости РК.

Научную новизну работы составляют:

1. Характеристики РК в интервалах изменения исследуемых факторов: конструктивный угол входа РК ($\beta_{1к}$) - $8,13^\circ \dots 14,1^\circ$; число Маха (M_{w2t}) - $0,38 \dots 2,82$; характеристическое число (U/C) - $0 \dots 0,66$; угол входа потока в РК (β_1) - $2,86^\circ \dots 31,72^\circ$; конструктивный угол выхода РК ($\beta_{2к}$) - $8,44^\circ \dots 15,35^\circ$.

2. Основы методики определения коэффициента скорости РК, угла выхода потока РТ из РК и их доверительных интервалов в работающей ступени турбины.

3. Регрессионные математические модели для расчета коэффициента скорости РК МРТ и угла выхода потока РТ из РК.

4. Значения коэффициентов скорости исследованных РК и угла выхода потока РТ из РК, полученные численным экспериментом.

5. Основы методики расчета газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК.

6. Значения совокупности исследуемых факторов, соответствующих максимально возможным коэффициентам скорости исследованных РК.

Объект исследований: рабочие колеса осевых малорасходных турбин.

Предмет исследований: оптимизация конструктивных параметров и режимных характеристик проточной части рабочих колес малорасходных турбин.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждена: статистической обработкой результатов измерений; использованием основных законов сохранения энергии и массы; сравнением результатов исследований с материалами других авторов; качественным согласованием экспериментальных результатов и модельными представлениями; проверкой регрессионных моделей на адекватность и непротиворечивостью известным научным положениям и фактам.

Практическая значимость:

разработанные основы методики определения эффективности работы РК и угла выхода потока РТ из РК могут быть использованы при проектировании МРТ;

полученные регрессионные математические выражения для определения коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ из РК следует использовать при расчете РК МРТ различного назначения;

разработанные основы методики позволяют рассчитать конструктивные параметры проточной части РК, обеспечивающие максимально возможный коэффициент скорости РК (в диапазоне проведенных исследований) в зависимости от режимных параметров.

разработанные основы методики позволяют рассчитать угол выхода потока РТ из РК в случае необходимости проектирования следующей ступени.

Личный вклад автора. При непосредственном участии автора формировались задачи исследования, *лично автором* выполнены: обработка результатов эксперимента; разработка основ методики определения коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ из него; определение доверительного интервала экспериментальных значений коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ из него; разработка регрессионных зависимостей для расчета коэффициента скорости РК МРТ и угла выхода потока РТ из него; проведение и анализ

численного эксперимента; разработка основ методики расчета газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК; оптимизация геометрических и режимных параметров по коэффициенту скорости РК.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на международном молодежном научном форуме-олимпиаде по приоритетным направлениям развития Российской Федерации, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2010); международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» ЦИАМ (Москва, 2010); международной научно-практической конференции «XXXIX неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2010); научном семинаре кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей» МАИ (Москва, 2010); Всероссийской научной конференции «Успехи механики сплошных сред» ДВО РАН (Владивосток, 2009); Всероссийской конференции «XXXV-ая Дальневосточная Математическая Школа-Семинар имени академика Е.В. Золотова» ДВО РАН (Владивосток, 2010); Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания» ТОВВМИ (Владивосток, 2010); научном семинаре кафедры «Судовые энергетические установки» ДВГТРУ (Владивосток, 2010); научной конференции «Вологдинские чтения» ДВГТУ (Владивосток, 2007, 2010); региональной научно-технической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс» ДВГТУ (Владивосток, 2007, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, включая три статьи в рецензируемых российских научных журналах, входящих в список ВАК, патент РФ на изобретение и 13 статей в сборниках трудов российских и международных конференций и научных трудов высших учебных заведений.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований модельных РК по коэффициенту скорости и углу выхода потока РТ из РК.
2. Основы методики расчета интегральных газодинамических характеристик (ψ и β_2) РК в составе работающей ступени турбины.
3. Регрессионные математические зависимости для расчета коэффициента скорости РК МРТ и угла выхода потока РТ из РК.
4. Основы методики расчета газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 125 стр., включая 76 стр. текста, 26 иллюстраций и 13 таблиц. Список литературы содержит 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы и показано, что для уменьшения потерь кинетической энергии от парциальности рекомендуется исполь-

зовать МРТ конструкции СПбГПУ. Выполнен критический анализ состояния рассматриваемого вопроса, по результатам которого выявлены недостатки и сформулированы задачи исследования РК МРТ конструкции СПбГПУ. Представлена научная новизна работы и структурная схема диссертации (рис. 1).

В первой главе выполнен анализ полученных ранее результатов в области исследования РК турбин, рассмотрены существующие методы исследований МРТ и их РК и установлено, что исследования газодинамических характеристик рабочих колес турбин могут быть выполнены следующим образом: теоретически (на основании решения уравнений сохранения энергии, состояния и движения рабочего тела аналитическими методами), численно (на основании численного решения уравнений Навье-Стокса) и экспериментально-теоретически (на основании экспериментальных исследований характеристик проточной части с последующим получением математических зависимостей по экспериментальным материалам).

Исследования течения газа в проточной части РК выполняются в одномерной постановке (исследование предполагает получение интегральных характеристик коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ из РК в виде результирующего вектора, имеющего модуль и направление), двумерной постановке (получение характеристик потока РТ в какой-либо плоскости в узлах сетки в виде векторов, имеющих свой модуль и направление) и трехмерной постановке (получение характеристик потока РТ по всей проточной части в узлах сетки в виде векторов, имеющих свой модуль и направление).

Расчеты потока РТ в каналах РК предполагают решение полного уравнения Навье-Стокса, что в настоящее время аналитически выполнить невозможно, особенно с учетом вращения РК.

Численные методы перспективны при анализе картины течения и для расчета интегральных характеристик потока в рабочих решетках турбины в широком диапазоне режимов обтекания. Применять результаты расчетов, полученные этим методом, можно только после экспериментального подтверждения. Решения численными методами не учитывают технологии изготовления моделей РК, оказывающей влияние на шероховатость поверхности и отклонение от формы. Последние дают значительную погрешность при малых размерах проточной части.

В настоящее время наиболее надежен и точен экспериментально-теоретический метод, основанный на систематизации и обобщении экспериментальных данных, получаемых на моделях и позволяющих получить эмпирические зависимости, учитывающие влияющие факторы. Метод обеспечивает достоверные исходные данные для проектирования МРТ и позволяет получать интегральные характеристики турбины в целом и ее элементов.

Экспериментальные исследования РК конструкции СПбГПУ в двумерной и трехмерной постановках приводят к неприемлемо высокой погрешности расчетов, что обусловлено влиянием размеров проточных частей и вращения РК.

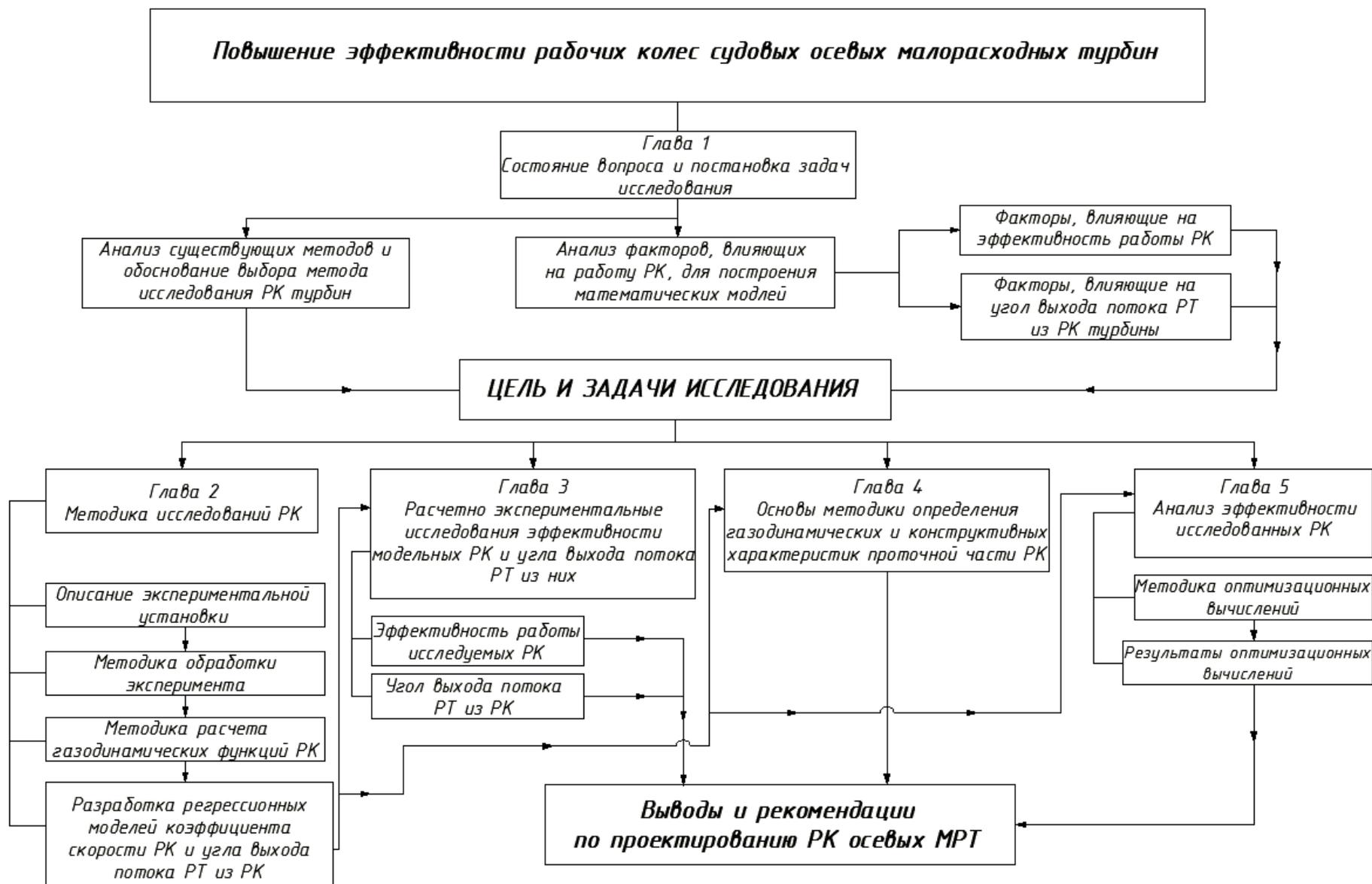


Рис. 1. Структура диссертационной работы

Учитывая последние особенности, можно утверждать, что полученные численными методами результаты, скорее всего, невозможно будет подтвердить экспериментально, поэтому результаты исследования РК такой конструкции представляются в виде интегральных характеристик.

Исследование РК необходимо было производить в составе ступени, так как это позволяло учесть все особенности работы реальной турбинной ступени (неравномерность натекающего потока на РЛ и параметров РТ из-за центробежных сил и нестационарность из-за вращения РК) и минимизировать ошибку результатов.

В результате рассмотрения различных факторов были выбраны наиболее влияющие на коэффициент скорости РК и угол выхода потока РТ из РК, которые использовались для исследований и построения регрессионных зависимостей. Для построения регрессионной зависимости коэффициента скорости РК учитывались конструктивный угол входа РК, угол входа потока в РК и число Маха на выходе из РК по теоретическим параметрам. Для построения регрессионной зависимости угла выхода потока РТ из РК использовались конструктивный угол выхода РК, число Маха на выходе из РК по теоретическим параметрам и характеристическое число (отношение окружной скорости РК к абсолютной теоретической скорости на выходе из РК).

Во второй главе приведено описание конструкции экспериментального стенда, изготовленного в СПбГПУ (рис. 2), позволившего получить исходные материалы для последующих разделов работы.

Стенд предназначался для динамического и статического исследования осевых МРТ, работающих при больших перепадах давлений ($\pi_T \leq 60$ и $t_0^* \leq 500^\circ\text{C}$), и позволял получать суммарные характеристики модельных ступеней в широком диапазоне изменения частот вращения РК ($0 \leq n \leq 500 \text{ c}^{-1}$) и перепадов давления ($2 \leq \pi_T \leq 60$) при изменении $P_0^* - 0,2 \dots 0,8$ МПа и $P_2 - 0,1 \dots 0,015$ МПа.

Рабочим телом служил воздух. Относительная случайная погрешность замеров составляла менее 3%. Для повышения достоверности экспериментальных данных в стенде применяли две независимые измерительные системы: колесо, обеспечивавшее осевой выход РТ (КОВ), и взвешенный СА, обладавший одной степенью свободы. Стенд позволил получить интегральные характеристики МРТ посредством измерения момента количества движения потока РТ и давления перед и за РК, расхода, температуры и утечки РТ и частоты вращения ротора. В работе были исследованы три модельных РК (рис. 3).

Доверительные оценки средних значений основывались на гипотезе нормального закона распределения случайных ошибок измерения. Допущение о нормальном распределении проверено по критерию Шапиро-Уилка.

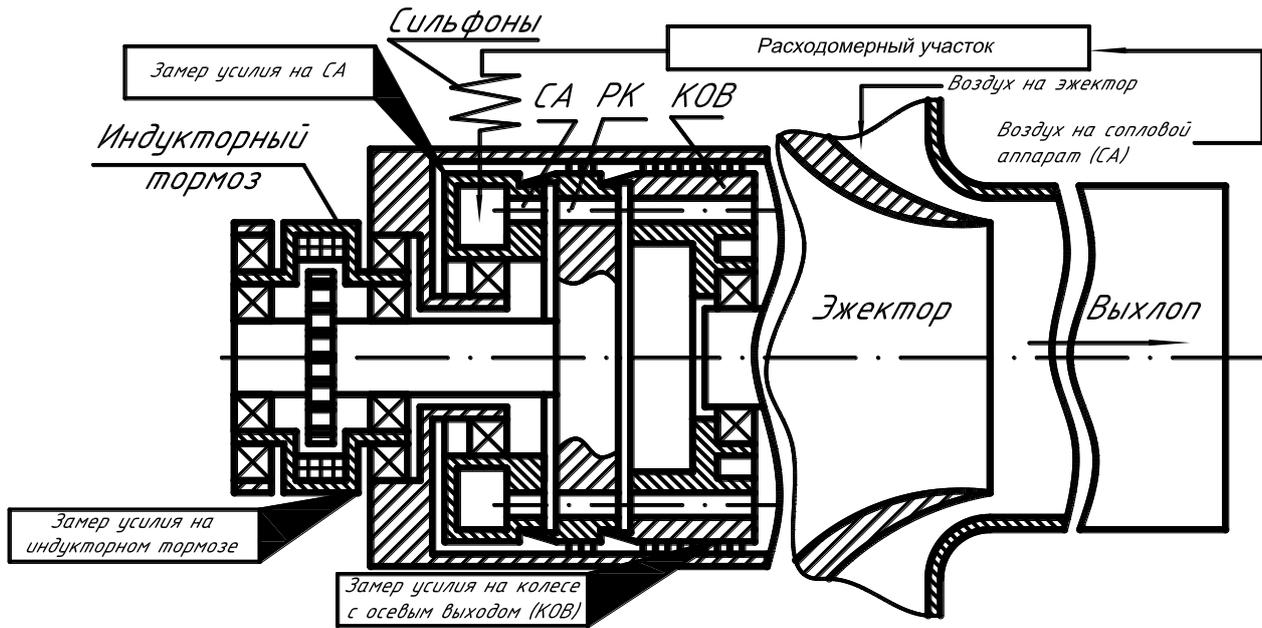


Рис. 2. Состав экспериментального стенда

При обработке замеров определены и исключены выбросы, которых выявлено менее 1% по отношению ко всей совокупности. Величина случайной погрешности замеров составила менее 1,5%. Суммарная погрешность замеров от случайной и приборной погрешностей составила менее 3,5%.

В главе приведено описание методики определения газодинамических характеристик РК, особенность которой заключалась в нахождении характеристик РТ за РК измерением крутящего момента на КОВ. Разработанная методика основана на законах сохранения момента, количества движения, энергии и массы и позволяла определить коэффициент скорости РК по параметрам РТ перед и за РК. Угол выхода потока РТ из РК в относительном движении определялся по треугольнику скоростей, используя абсолютный угол выхода потока РТ из РК и окружную скорость РК.

В результате расчет сводился к определению двух газодинамических функций РК - коэффициенту скорости и углу выхода потока РТ.

Исходные данные имели погрешность, поэтому для нахождения функций решалась задача минимизации и максимизации от влияющих замеров с ограничениями в виде доверительного интервала. После нахождения максимума и минимума искомой функции определялось их среднеарифметическое значение, которое в последующем принималось за математическое ожидание, а максимальное и минимальное значения - за доверительные интервалы функции.

В результате расчетов по всему эксперименту средняя погрешность по коэффициенту скорости РК составила 8% и по углу выхода потока РТ из РК - 20%.

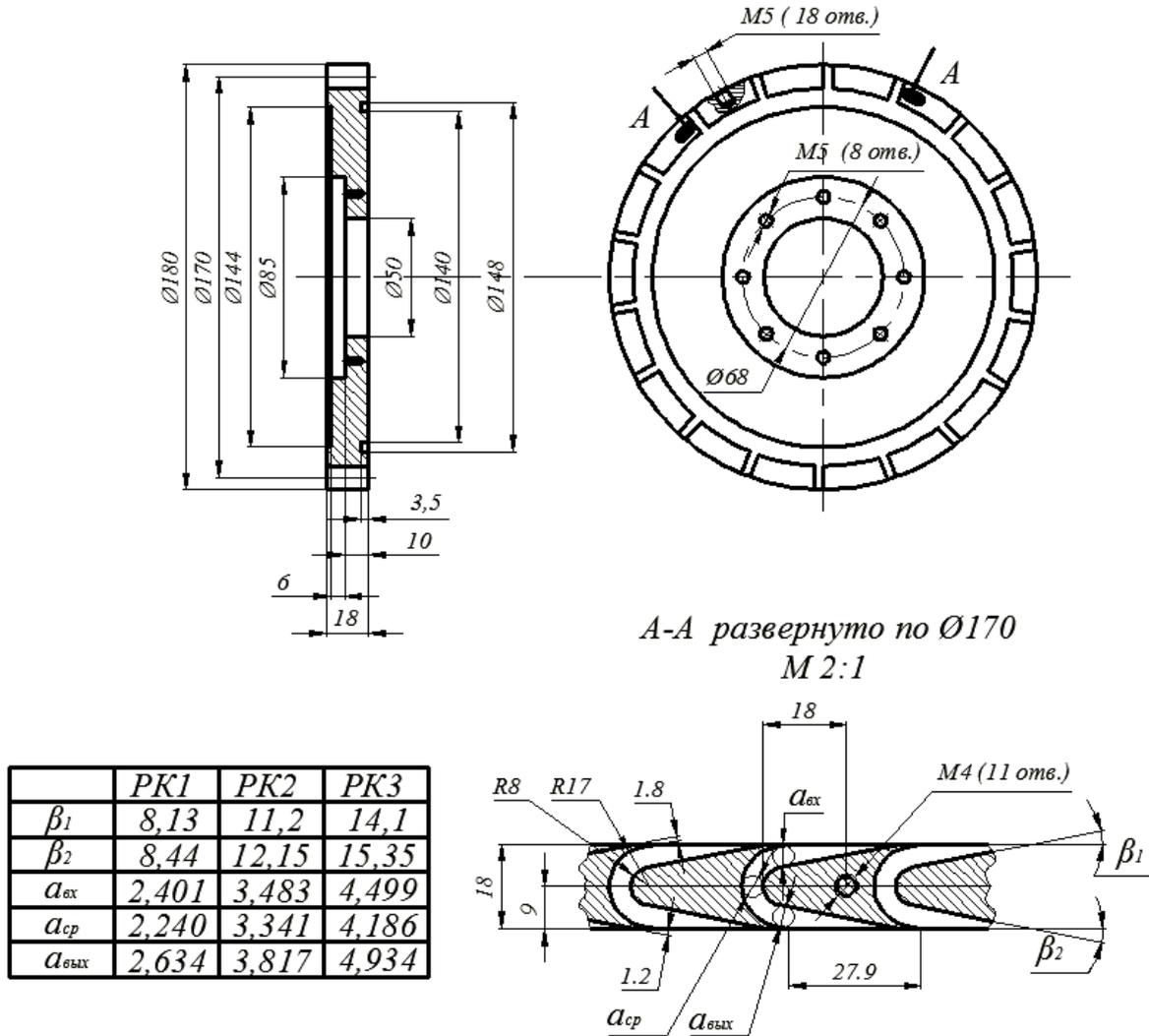


Рис. 3. Модельные рабочие колеса

На основании анализа содержания литературных источников аналитические зависимости коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ из РК были приняты в виде полинома второго порядка

$$\psi = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 b_{ji} x_i x_j \quad - \text{коэффициент скорости РК,} \quad (1)$$

где b_i и b_{ij} – коэффициенты полинома; x_1 – угол входа потока в РК; x_2 – конструктивный угол входа РК; x_3 – число Маха на выходе из РК по теоретическим параметрам.

$$\beta_2 = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 b_{ji} x_i x_j \quad - \text{угол выхода потока РТ из РК,} \quad (2)$$

где b_i и b_{ij} – коэффициенты полинома; x_1 – конструктивный угол выхода РК; x_2 – число Маха на выходе из РК; x_3 – характеристическое число.

В третьей главе на основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость коэффициента скорости РК, необходимая для оценочных и оптимизационных расчетов в диапазоне выполненных исследований. Регрессионная зависимость угла выхода потока РТ из РК в относительном движении позволяет определять его величину при необходимости проектирования следующей ступени турбины.

Проверка полученных регрессионных моделей позволила считать их адекватно отражающими реальные физические процессы в РК МРТ в исследованном диапазоне геометрических и режимных параметров.

Корреляционным анализом была исключена мультиколлинеарность факторов. Расчеты показали, что факторы не коррелировали между собой. Анализ моделей показал незначительные функциональные зависимости между рассмотренными факторами и уровень влияния последних на целевую функцию.

В работе приведены результаты численного эксперимента по исследованию зависимости характеристик (ψ и β_2) РК от их режимных параметров и геометрических характеристик.

Установлено, что с увеличением числа M для РК конструкции СПбГПУ наблюдается увеличение коэффициента скорости (рис. 4), что можно объяснить влиянием профиля межлопаточного канала, имевшего суживающе-расширяющуюся форму, применяемую для РК, работающих при больших числах $M > 1,5$.

При малых M_{w2t} конструктивный угол входа РК незначительно влияет на коэффициент скорости РК, с увеличением M_{w2t} влияние $\beta_{1к}$ усиливается. Это объясняется тем, что при дозвуковых скоростях потока отклонение угла атаки от оптимального не приводит к значительному увеличению профильных потерь энергии. Увеличение $\beta_{1к}$ при больших M_{w2t} сопровождается снижением коэффициента скорости РК из-за увеличения волновых потерь, вызванных отклонением угла атаки от оптимального.

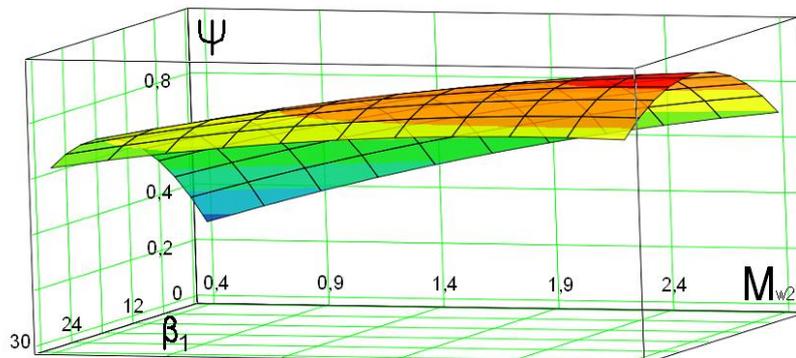


Рис. 4. Зависимость коэффициента скорости от β_1 и M_{w2t} при $\beta_{1к}=8,13^\circ$

Установлено, что при положительных углах атаки повышение M_{w2t} увеличивает прирост коэффициента скорости РК (рис. 5,а) из-за суживающе-

расширяющейся формы каналов РК, которые предназначены для работы при больших сверхзвуковых скоростях.

В области безударного входа ($\beta_{1к} \approx \beta_1$) наблюдается незначительный рост коэффициента скорости РК (рис. 5,б). При больших отрицательных углах атаки коэффициент скорости РК остается практически постоянным во всем диапазоне изменения числа Маха (рис. 5,в).

Из рис. 5 следует, что при малых отрицательных углах атаки коэффициент скорости РК имеет наибольшее значение. Это подтверждает вывод о существовании оптимального угла атаки в области его малых отрицательных значений.

При малых M_{w2t} влияние $\beta_{2к}$ на β_2 в работе не установлено (рис. 6,а), что можно объяснить влиянием числа M на расширительную способность косога среза, вследствие чего при малых значениях M определяющее воздействие на β_2 оказывают кромки КОВ, расположенного за РК. При увеличении M_{w2t} происходит рост β_2 и, обусловлено это особенностью расширения потока в косом срезе, отклоняющего поток относительно оси канала, в результате чего угол выхода РТ из канала РК оказывается больше угла выходного сечения.

При больших значениях U/C $\beta_{2к}$ существенно влияет на β_2 (рис. 6,б). Влияние M_{w2t} при этом снижается из-за усиления шаговой неравномерности, возникающей вследствие течения РТ в КОВ, имеющее неподвижные лопатки, которые порождают образование вихрей большой интенсивности. Влияние последних оказывается сильнее влияния числа Маха.

Расчеты показали, что угол выхода потока РТ имеет экстремум по характеристическому числу (рис. 7). Объясняется это усилением влияния шаговой неравномерности до определенного значения, после которого интенсивность вихрей между РК и КОВ начинает превышать влияние других факторов, не позволяя потоку отклоняться и прижимает его к РК.

В четвертой главе приведены основы методики определения газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК.

Для расчетов по предложенной методике необходимо задать: M_{w2t} , β_1 и U/C .

По ним и приведенной регрессионной зависимости для коэффициента скорости РК определяется $\beta_{1к}$, соответствующий максимально возможному ψ при заданной совокупности параметров. Далее рассчитываются остальные геометрические параметры - $\beta_{2к}$, $a_{вх}$, $a_{ср}$ и $a_{вых}$.

По известному $\beta_{2к}$, используя приведенную регрессионную зависимость рассчитывается β_2 .

В пятой главе приведены результаты анализа эффективности работы исследованных РК, оценка которой базируется на регрессионной экспериментальной зависимости в диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров - $\beta_1 = 2,86 \dots 31,72$, $\beta_{1к} = 8,13 \dots 14,1$ и $M_{w2t} = 0,38 \dots 2,82$.

В главе выявлено наличие локальных оптимумов по коэффициенту скорости РК при определенных совокупностях факторов, входящих в аппроксима-

ционную модель.

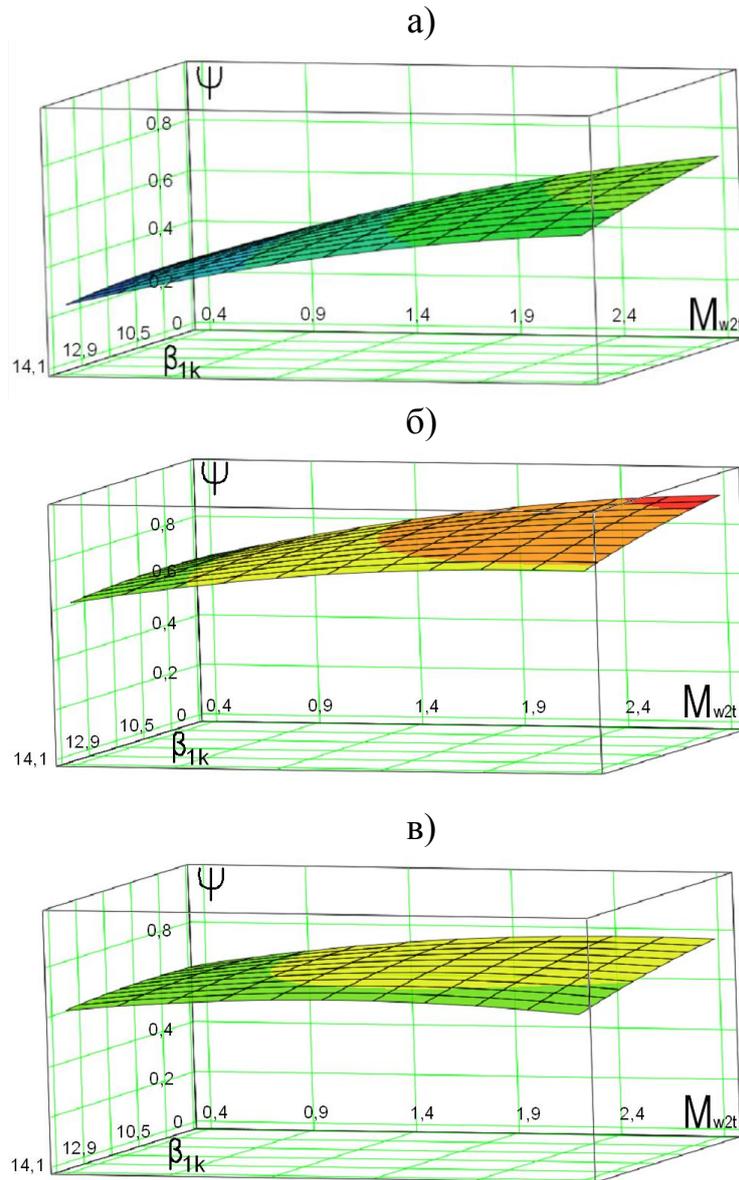


Рис. 5. Зависимость коэффициента скорости от M_{w2t} и β_{1k} :
 а) $\beta_1=2,86^\circ$; б) $\beta_1=11,2^\circ$; в) $\beta_1=31,72^\circ$

В связи с этим существовала опасность ошибочного принятия локального оптимума функции за оптимальное значение коэффициента скорости РК, что потребовало выполнения оптимизации в два этапа:

1 этап - поиск области глобального оптимума сканированием по сетке с крупным шагом;

2 этап - уточнение экстремума коэффициента скорости РК методом покоординатного спуска.

На первом этапе определяли значения коэффициента скорости РК в узловых точках координатной сетки, построенной с крупным шагом, среди которых находились его наибольшие значения. Метод, не отличаясь высокой точно-

стью, требовал больших затрат времени и соответствующих этому вычислительных машин, чем и объясняется достаточно крупный шаг для расчетов.

После определения области глобального экстремума коэффициента скорости РК методом покоординатного спуска проводилось уточнение его экстремума.

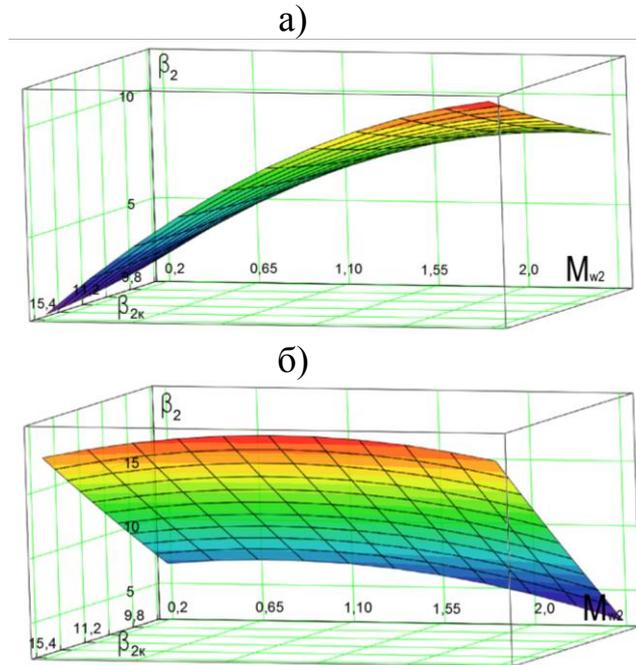


Рис. 6. Зависимость угла выхода потока РТ из РК от M_{w2t} и β_{2k} :
а) $U/C=0$; б) $U/C=0,66$

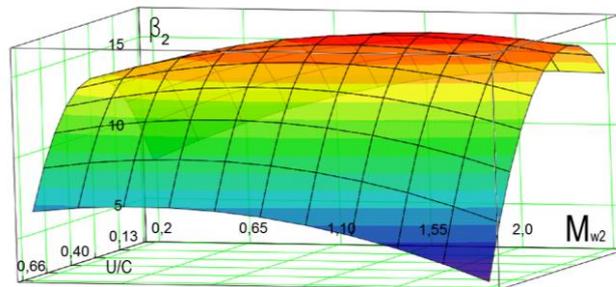


Рис. 7. Зависимость угла выхода потока РТ из РК от M_{w2t} и U/C при $\beta_{2k}=8,44^\circ$

В результате оптимизационных вычислений были установлены максимально возможные значения коэффициента скорости исследованных РК (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что наибольшая возможная эффективность получена у РК-1. У РК-2 коэффициент скорости меньше, и у РК-3 - еще меньше. В целом максимальная эффективность модельных РК находится в области больших чисел Маха, что объясняется суживающе-расширяющейся формой проточной части канала РК, предназначенной для работы при больших сверхзвуковых скоростях. Число Маха соответствовало максимальному значению в пределах эксперимента для РК-1 и РК-2. Для РК-3 его значение меньше, что обусловлено

увеличением угла атаки, для которого оптимальное значение числа Маха снижено.

В главе приведены расчеты для определения оптимального угла атаки (табл. 2).

Таблица 1 – Результаты оптимизации модельных РК

Модельное рабочее колесо	Параметры		
	β_1	M_{w2t}	ψ
РК-1	18,68	2,82	0,92
РК-2	18,76	2,82	0,87
РК-3	19,73	2,42	0,79

Таблица 2 – Оптимальные углы атаки для исследованных РК

Модельное рабочее колесо	Параметры	
	i	ψ
РК-1	-10,55	0,92
РК-2	-7,56	0,87
РК-3	-5,63	0,79

Из табл. 2 следует, что при отрицательных углах атаки потери энергии в проточной части РК снижаются. Установлено, что при малых конструктивных углах входа РК угол атаки должен быть максимально отрицательным. При возрастании конструктивного угла входа РК отрицательность угла атаки должна быть меньше. Это можно объяснить возможным явлением отрыва на участке наибольшей кривизны канала, которое возникнет в РК с наибольшим углом поворота. Для исключения отрыва в проточной части РК оптимальный угол атаки для него с каналами большой кривизны должен быть максимально отрицательным, с уменьшением кривизны канала - менее отрицательным. Зависимости коэффициента скорости РК от угла атаки приведены на рис. 8.

Применение разработанной методики оптимизационных расчетов позволит проектировать высокоэффективные РК с большим углом поворота проточной части, коэффициент скорости которых будет достигать 0,92. Последнее делает их перспективными для создания новых сверхзвуковых турбин с относительно малым расходом рабочего тела.

Для работы на сверхзвуковых скоростях предпочтительно применять суживающе-расширяющуюся форму канала РК.

Рабочие колеса следует проектировать так, чтобы конструктивный угол входа обеспечивал отрицательные углы атаки.

Это обеспечит меньшие потери кинетической энергии. Чем больше будет угол поворота проточной части РК, тем оптимальнее будут отрицательные углы атаки.

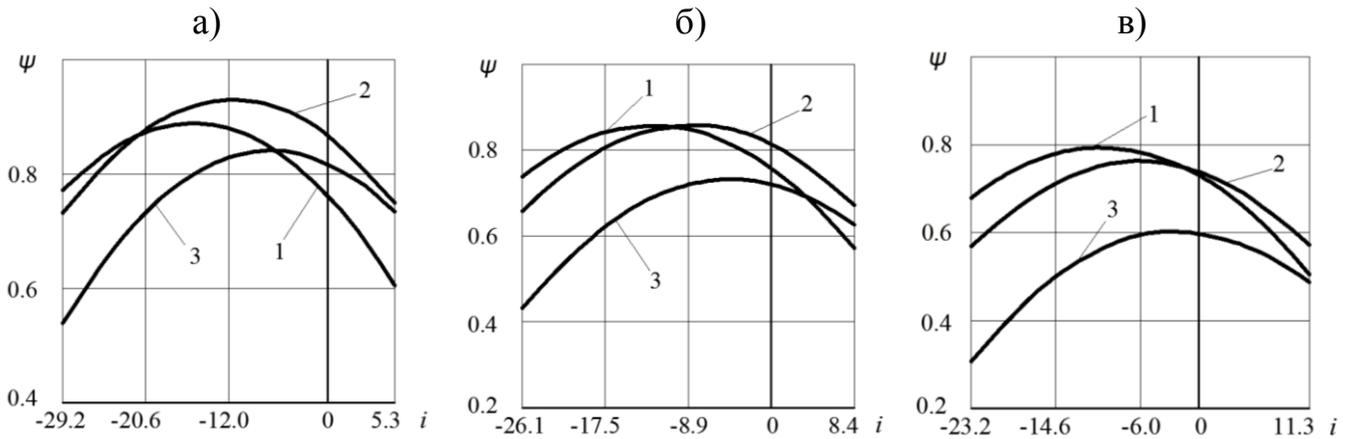


Рис. 8. Влияние угла атаки на коэффициент скорости:

1 - $M_{w2t}=0,38$; 2 - $M_{w2t}=1,60$; 3 - $M_{w2t}=2,82$

а) РК-1; б) РК-2; в) РК-3

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выполненные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Суммарная погрешность замеров (t_0^* , $M_{ков}$, G , P_1 , P_2 , n) от случайной и приборной погрешностей составляла менее 3%;

2. Разработаны основы методики, особенность которой заключается в нахождении характеристик рабочего тела за рабочим колесом посредством измерения крутящего момента на КОВ, позволяющей получать значения коэффициента скорости РК и угла выхода потока РТ.

3. Получены регрессионные математические модели для расчета коэффициента скорости РК МРТ и угла выхода потока РТ из РК.

4. Установлено существование оптимального угла атаки в области их малых отрицательных значений и показано, что при положительных углах атаки увеличиваются потери энергии. Также установлено, что с увеличением числа M растет коэффициент скорости исследованных РК.

5. Установлено, что при малых M_{w2t} $\beta_{2к}$ на β_2 влияет незначительно. С увеличением M_{w2t} происходит рост β_2 и угол выхода потока РТ имеет экстремум по характеристическому числу.

6. Разработаны основы методики расчета газодинамических и конструктивных характеристик проточной части РК.

7. Установлены условия получения максимально возможного значения коэффициента скорости РК для исследованного диапазона величин ($\beta_1=2,86\dots31,72$, $\beta_{1к}=8,13\dots14,1$ и $M_{w2t}=0,38\dots2,82$) - $\Psi=0,92$.

Автор выражает благодарность Заслуженному работнику высшей школы Российской Федерации, доктору технических наук, профессору В.Т. Луценко за ценные советы, замечания и помощь в редактировании диссертации и автореферата.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Публикации в изданиях перечня ВАК:

1. Фершалов Ю.Я., Симашов Р.Р., Фершалов А.Ю. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока в составе осевой малорасходной турбины // Судостроение. - 2009. - №6. - С. 56-59.
2. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю. Сопловой аппарат осевой малорасходной турбины // Судостроение. – 2010. - №3. - С. 46-47.
3. Фершалов А.Ю., Грибиниченко М.В., Фершалов Ю.Я. Эффективность рабочих колес осевых малорасходных турбин с большим углом поворота // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2011. - №1. - С. 52-55.

Патент РФ на изобретение:

4. Патент РФ №2338887. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Фершалов М.Ю. Ступень осевой турбины. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений РФ 20.11.2008.

Публикации в сборниках трудов российских и международных конференций и научных трудов высших учебных заведений:

5. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. Состояние вопроса и определение цели исследования сверхзвуковых осевых малорасходных турбин //Сб. материалов науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВГТУ, 2007. - С. 100-102.
6. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. Повышение эффективности сопловых аппаратов малорасходных турбин //Сб. материалов науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВГТУ, 2007. - С. 6-9.
7. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. Получение газодинамических характеристик рабочих колес малорасходных турбин //Региональная науч.- техн. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс». – Владивосток: ДВГТУ, 2007. - С. 24-27.
8. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов новой конструкции //Всероссийская науч. конф. «Успехи механики сплошных сред». – Владивосток: ДВО РАН, 2009. - С.47-48.
9. Фершалов А.Ю. Получение статистических моделей газодинамических характеристик рабочих колес малорасходных турбин //Дальневосточная конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по теоретической и прикладной математике. – Владивосток: ДВГУ, 2009. - С. 80-81.
10. Фершалов А.Ю. Актуальность и методы исследования рабочих колес малорасходных турбин //Региональная науч.-практ. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс». Ч. 3. – Владивосток: ДВГТУ, 2010. - С. 100-103.
11. Фершалов А.Ю. Газодинамические характеристики большешаговых рабочих колес малорасходных турбин //Всероссийская конф. «XXXV-ая Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова». – Владивосток: ДВО РАН, 2010. - С.680-685.

12. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. Повышение эффективности осевых малорасходных турбин на основе оптимального проектирования рабочих колес // Сб. международного молодежного научного форума-олимпиады по приоритетным направлениям развития Российской Федерации. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - С. 271-277.

13. Фершалов А.Ю., Грибиниченко М.В., Цыганкова Л.П. Рабочие колеса малорасходных турбин для привода корабельных устройств //Материалы 53-й Всероссийской конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». Т. 3. – Владивосток: ТОВВМИ, 2010. - С. 210-214.

14. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. Газодинамические характеристики проточной части рабочих колес турбин с большим относительным шагом // Материалы международной науч.-практ. конф. «XXXIX неделя науки СПбГПУ». Ч. III. - СПб.: СПбГПУ, 2010. - С.42-43.

15. Фершалов Ю.Я., Цыганкова Л.П., Фершалов А.Ю. Факторы, наиболее сильно влияющие на газодинамические характеристики сопловых аппаратов осевых турбин // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта: Сб. науч. тр. Вып. 48. – Владивосток: ДВГТУ, 2010. - С. 275-286.

16. Фершалов Ю.Я., Цыганкова Л.П., Акуленко В.М., Фершалов М.Ю, Фершалов А.Ю. // Перспективность исследований и область применения малорасходных турбин //Сб. материалов науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВГТУ, 2010. - С. 159-164.

17. Фершалов А.Ю. Влияние угла атаки на эффективность большешаговых рабочих колес осевых малорасходных турбин //Сб. материалов науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВГТУ, 2010 - С. 176-178.