

На правах рукописи

Семакина Елена Юрьевна

# РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТЕПЛОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого»

Научный консультант:

доктор технических наук, доцент Черников Виктор Александрович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент Богомолова Татьяна Владимировна, профессор кафедры паровых и газовых турбин, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва;

доктор физико-математических наук, профессор **Исаев Сергей Александрович**, заведующий лабораторией фундаментальных исследований, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», г. Санкт-Петербург;

доктор технических наук, профессор **Чехранов Сергей Валентинович**, профессор кафедры «Судовые энергетические установки», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 27 апреля 2021 г. В 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.05.04.12, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главное здание, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://elib.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.05.04.12 к.т.н., доц.

TAM

В.В. Барсков

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ <u>Актуальность темы исследования</u>

Внедрение в энергетику установок, основанных на применении паровых и газовых турбин в составе высокоэффективного парогазового цикла, уже сегодня обеспечивает большие выгоды и будет возрастать, так как к 2070г. доля газа в мировом топливном балансе достигнет примерно 30% при одновременном росте новых генерирующих мощностей. До недавнего времени в РФ внедрение парогазовых технологий в электроэнергетику осуществлялось на базе ГТУ зарубежного производства. Сегодня развитие собственного производства газовых турбин стало одним из приоритетных направлений для Российской Федерации. Актуальность этой проблемы подтверждается постановлением правительства РФ №719, а также тем, что развитие и совершенствование технологий проектирования и производства стационарных газовых турбин является частью стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года.

В настоящее время прирост энергетической мощности в Российской Федерации реализуется за счет паротурбинных установок большой единичной мощности. К ним относятся установки АЭС с паровыми турбинами мощностью 1000 – 1200 МВт и установки, работающие на органическом топливе мощностью от 300 до 800 МВт.

В производстве электроэнергии наиболее целесообразно и экономически выгодно применение турбин большой единичной мощности. Для таких турбин повышение КПД даже в пределах 1,0 -1,5% приводит к ощутимой экономии топлива и снижает негативное влияние на экологию. Создание новых конкурентоспособных тепловых турбин в предельно сжатые сроки может быть достигнуто только на основе достоверного численного моделирования рабочих процессов, протекающих в проточных частях турбин. Поэтому разработка нового подхода к организации аэродинамических исследований элементов проточных частей паровых и газовых турбин, основанного на тесном взаимодействии расчета и физического эксперимента, является актуальной задачей, решение которой позволит выйти на новый качественный уровень их проектирования.

# Степень её разработанности.

В настоящее время повышенный интерес к исследованиям аэродинамики проточных частей турбин обусловлен резким увеличением мощностей в одном энергетическом турбоагрегате, достигающих величин порядка 1000 - 1800 МВт. В этих условиях аэродинамические проблемы турбин являются одними из важнейших предметов научнотехнических исследований ведущих промышленных турбиностроительных предприятий, таких как ПАО ЛМЗ, АО УТЗ, ПАО КТЗ, Siemens AG, GE, Mitsubishi Power и др.

Подавляющее исследований большинство таких выполняются специализированными научно-исследовательскими институтами И университетами. Большой вклад в развитие различных методов измерения параметров пространственного потока внесли ЦИАМ, ЦАГИ и ВТИ, а также ряд зарубежных организаций – университеты Брауншвейга и Штутгарта, Лейбниц университет Ганновера и др. В частности, созданные и усовершенствованные пневмометрические насадки применяются для исследования аэродинамики турбомашин в МЭИ, ЦКТИ, СПбПУ, ЛМЗ, а также, в зарубежных исследовательских организациях.

До недавнего времени экспериментальные аэродинамические исследования имели только прикладное значение. С развитием численных методов на первый план выходят потребность в валидации CFD моделей, которую следует выполнять не только по экспериментальным значениям интегральных характеристик, но и по структуре потока в исследуемой области. Это обстоятельство накладывает новые требования на качество экспериментальных исследований и требует нового подхода к организации комплексных расчетно-экспериментальных работ.

В настоящее время существующий разрыв между экспериментом и численным моделированием является характерной чертой состояния исследований в области аэродинамики турбомашин, поскольку в опубликованных работах отсутствует

систематизированный подход к тестированию CFD моделей по полям локальных параметров потока с количественной оценкой степени совпадения результатов расчета и эксперимента.

#### <u>Цели и задачи</u>

Целью работы является разработка научно-технических методов совершенствования аэродинамики проточных частей турбин, основанных на новом уровне взаимодействия расчетных и экспериментальных исследований за счет повышения точности аэродинамического эксперимента, а также разработки новых методик тестирования численных моделей и методик анализа результатов.

Задачи исследования:

- ✓ Разработка и внедрение методики валидации CFD моделей в проточных частях турбин по полям параметров потока на основе применения статистических методов.
- ✓ Реализация комплексного подхода к организации аэродинамических исследований элементов проточных частей турбин на основе тесного сочетания численного моделирования и физического эксперимента.
- Создание автоматизированных информационно-измерительных систем (ИИС) и разработка их программного обеспечения для экспериментальных стендов ЭТ4, ЦНД и TC-1M лаборатории Турбиностроения СПбПУ с обеспечением регистрации параметров периодической нестационарности потока.
- ✓ Разработка математической модели и создание программного комплекса для обработки данных траверсирования, включающего процедуру перехода через калибровочные характеристики 3D зондов с учетом параметров периодической нестационарности потока.
- ✓ Модернизация калибровочного стенда TC-1M и его информационно-измерительной системы для обеспечения возможности калибровки 3D пневмометрических векторных зондов в периодически нестационарном потоке.
- ✓ Экспериментально-расчетные исследования аэродинамики моделей ступеней, выходных трактов и блоков «Ступень – Выходной тракт» стационарных ГТУ большой мощности.
- ✓ Обобщение результатов экспериментальных исследований и углубленный анализ аэродинамических процессов в турбинных ступенях и в блоках «Ступень – Выходной тракт» с помощью вариантных расчетов по валидированным CDF моделям.
- ✓ Разработка рекомендаций по совершенствованию аэродинамических качеств элементов проточных частей турбин.

<u>Научная новизна</u> работы заключается в принципиально новом подходе к организации исследований аэродинамики проточных частей тепловых турбин, основанном на тесном взаимодействии численного моделирования и физического эксперимента.

- 1. На основе применения методов статистического анализа разработана новая методика валидации CFD моделей течения в элементах проточных частей турбин в области дозвуковых потоков (*M* ≤ 0,8÷0,85) путем сопоставления расчетной и экспериментальной структуры трехмерного потока в контрольных измерительных сечениях.
- 2. В результате обобщения экспериментального материала большого объема, а также методом численного моделирования получены новые знания по влиянию следующих факторов:
  - крупномасштабных периферийных вихревых структур на экономичность турбинных ступеней с отношением 3,5≤D<sub>cp</sub>/l≤8 и выходных трактов одновальных и двухвальных стационарных ГТУ большой мощности;
  - типа закрутки последней ступени на восстановительные процессы в выходном диффузоре и на эффективность работы блока «Ступень – Диффузор» ГТУ большой мощности;

- формы силовых стоек в выходном диффузоре на качество восстановительного процесса в нем;
- радиального зазора над РК последней ступени на КПД блока «Ступень Диффузор».
- 3. Разработана и внедрена методика калибровки пневмометрических векторных 3D зондов в периодически нестационарном потоке.
- 4. Получены новые экспериментальные данные по распределению параметров потока в затопленной струе калибровочного стенда для квазистационарного и периодически нестационарного течения в диапазоне чисел Маха  $0,1 \le M \le 0,9$  и частоты пульсаций  $0 \le f \le 1,32$  кГц.
- 5. Впервые получены и используются при обработке результатов траверсирования калибровочные характеристики пневмозондов в периодически нестационарном потоке.
- 6. Разработан алгоритм и создана зарегистрированная компьютерная программа для интерполяции и трехмерного представления полей параметров 3D потока, полученных в результате траверсирования в контрольных измерительных сечениях.
- 7. Предложен и внедрен корреляционный метод количественной оценки степени совпадения расчетных и экспериментальных зависимостей.
- 8. Разработан алгоритм и создана зарегистрированная компьютерная программа для построения корреляционных поверхностей параметров потока по выбранному режимному параметру, позволяющие определить области их наибольшего влияния.

<u>Теоретическая и практическая значимость</u> представленных в работе выводов и обобщений заключается в возможности получения однозначного, экспериментально обоснованного цифрового двойника потока рабочей среды в проточных частях турбин. Новый подход к организации аэродинамических исследований в значительной степени повысит качество и сократит сроки проектирования стационарных паровых и газовых турбин.

Обоснованны и сформулированы рекомендации по проведению аэродинамических исследований:

- комплексный подход к проведению исследований, подразумевающий параллельный и взаимосвязанный численный и физический эксперимент;
- обязательное использование предвключенной турбинной ступени в качестве генератора входного потока при изучении потока в выходных трактах различной конфигурации;
- сочетание традиционного пневмометрического метода измерения параметров 3D потока с использованием современных малоинерционных датчиков для регистрации параметров нестационарного потока.

<u>Методология и методы исследования</u>. Исследование базируется на тесном сочетании расчетных и экспериментальных методов изучения аэродинамических процессов в проточных частях турбомашин. Повышение уровня этого взаимодействия достигается за счет принципиально новой разработанной автором методики валидации численных моделей по структуре 3D потока, основанной на применении методов статистического анализа. Для тестирования численных моделей использовались данные траверсирования трехмерного потока в контрольных измерительных сечениях, полученные при испытаниях модельных турбинных ступеней и их блоков с выходными трактами различной конфигурации. На основе обширного экспериментального материала по аэродинамике ступеней и выходных трактов, а также с помощью углубленного анализа структуры потока по данным расчетов получены новые знания по аэродинамике турбинных ступеней и выходных трактов.

С помощью новых методов представления трехмерных полей параметров потока, полученных как экспериментальным, так и расчетным путем, выполнен детальный анализ рабочих процессов в проточных частях элементов турбин.

# Положения, выносимые на защиту.

- ✓ Методика валидации численных моделей потока в элементах проточных частей турбин по полям локальных параметров потока методом статистического анализа.
- ✓ Методика калибровки 3D пневмометрических векторных зондов в периодически нестационарном потоке и получения калибровочных характеристик 3D пневмометрических векторных зондов с учетом периодической нестационарном потока.
- ✓ Программное обеспечение для обработки данных траверсирования с учетом периодической нестационарности потока.
- ✓ Рекомендации по организации комплексных расчетно-экспериментальных аэродинамических исследований проточных частей турбомашин.
- ✓ Рекомендации по совершенствованию конструкций элементов проточных частей турбомашин с целью повышения их аэродинамических качеств.
- ✓ Результаты обобщения и анализа экспериментально-расчетных исследований:
  - структуры трехмерного потока за рабочими колесами ступеней турбины,
  - механизма влияния крупномасштабных вихревых структур за РК последней ступени на эффективность работы диффузора,
  - влияния входных граничных условий на интегральные характеристики выходных диффузоров и блоков «Ступень – Диффузор» и геометрических характеристик диффузора,
  - влияния типа закрутки последней ступени на качество восстановительного процесса в диффузоре.

<u>Степень достоверности и апробация работы</u> Достоверность и обоснованность результатов работы определяется использованием современных методов исследования для решения поставленных задач, а также классического математического аппарата статистической обработки данных. Достоверность и обоснованность выводов по работе подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: LXVI и LXVII Научно-технических сессиях комиссии РАН по проблемам газовых турбин в 2019 и 2020 г.г.; международных конференциях - 39 Kraftwerktechnisches Kolloquium (KWTK), Dresden, 2007г.; 40 KWTK, Dresden, 2008г.; 43 KWTK, Dresden, 2011г.; WorkShop-Diffusor: I, Leibniz Uniwersität Hannover, 2007 г.; II, Technische Universität Stuttgart, 2016 г.; III.; IV, Polytechnische Universität St.Petersburg, 2010 г.; Wissenschaftliches Simposium an der Leibniz Universität Hannover, 2010 г.

# КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### Введение

В настоящее время моделирование рабочих процессов в проточных частях тепловых турбин чаще всего выполняются численными методами. При этом тестированию CFD моделей, которое может проводиться только по результатам физического эксперимента, уделяется крайне мало внимания, ограничиваясь, как правило, сравнением по интегральным характеристикам. Такой способ валидации не позволяет однозначно определить цифровой двойник сложного трехмерного течения в проточных частях турбин, так как напрямую не тестируется его структура, определяющая интегральные характеристики потока.

Современные цифровые технологии позволяют сблизить численный и физический эксперимент в такой степени, чтобы однозначно, с достаточной надежностью, определить цифровой двойник исследуемого потока в определенном диапазоне изменения геометрических и режимных параметров.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, а также списка литературы из 107 наименований. Материал изложен на 230 страницах, содержит 163 рисунка и 12 таблиц.

По существу целесообразно представить структуру исследований, изложенных в диссертации, в виде диаграммы:

# РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТЕПЛОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА



Глава 1 посвящена анализу современных средств исследования газодинамики и моделирования течения рабочей среды в проточных частях турбин. В ней дан подробный обзор методов и средств измерений параметров потока, на основе которого проведен статистический анализ применимости различных инструментов и методик проведения физического эксперимента в аэродинамических исследованиях элементов проточных частей турбин. В этой же главе сделан обзор методов численного моделирования трехмерного течения в турбомашинах, а также методов валидации численных моделей.

На рисунке 1 представлена сравнительная диаграмма, демонстрирующая популярность и степень востребованности различных методов измерения параметров потока в аэродинамических исследования проточных частей турбин.

На основе результатов анализа сделан вывод о том, что наиболее применимым и востребованным на сегодняшний день является пневмометрический метод измерения в сочетании с различными малоинерционными датчиками давления и термоанемометрами.



Рисунок 1 – Статистика применения методов измерения параметров потока в экспериментальных исследованиях течения в элементах проточных частей турбин

По результатам обзора методов физического и численного моделирования рабочих процессов в элементах турбомашин сделано заключение о существовании проблемы разобщенности физического и численного экспериментов и намечены пути их сближения. Основными шагами в этом направлении являются повышение точности экспериментальных исследований и переход на новый уровень валидации расчетных моделей. В связи с этим ставится задача организации комплексных расчетно-экспериментальных исследований аэродинамики проточных частей турбин, с помощью которой разрешаются следующие проблемы:

- Разобщенность расчетных и экспериментальных исследований (по времени и по исполнителям) приводит к недостатку данных экспериментальных исследовании и (или) к некорректной трактовке результатов эксперимента.
- Валидация CFD модели только по интегральным характеристикам не гарантирует однозначность принятой модели. При нелинейных зависимостях интегральных показателей от параметров режима нагрузки одинаковые значения интегральных величин могут соответствовать различным структурам течения.
- Качественные характеристики, используемые для оценки степени совпадения сравниваемых зависимостей, не позволяют сопоставлять степень адекватности различных моделей при выборе оптимального метода численного моделирования течения.

Результаты исследований, представленные в последующих главах, демонстрируют эффективность предлагаемого подхода.

В главе 2 дано подробное описание экспериментальной базы для исследований аэродинамики элементов проточных частей турбин в лаборатории Турбиностроения СПБПУ. Приведено детальное описание экспериментальных стендов для исследования турбинных ступеней, выходных трактов и блоков «Ступень – Выходной тракт» различной конфигурации, а также стенда для калибровки 3D пневмометрических векторных зондов.

На рисунках 2 ... 5 представлены продольные разрезы стендов ЭТ4 и ЭС-ОВ-ЦНД. Универсальный стенд ЭТ4 представлен в трех модификациях, предназначенных для испытаний турбинных ступеней, блоков «Ступень – Диффузор» и блоков «Ступень – Диффузор – Патрубок». Для каждого экспериментального стенда представлено описание его информационно-измерительной системы и методики обработки экспериментальных данных, включающей алгоритм перехода через калибровочные зависимости и методику осреднения параметров потока по данным траверсирования при получении интегральных характеристик. Приводятся примеры традиционных приемов представления результатов измерений, а также их представление в виде трехмерных полей и поверхностей.

Для всех измеряемых и вычисляемых параметров потока определены величины неопределенностей, обусловленные показателями точности используемых датчиков, спецификой проведения экспериментальных исследований и алгоритмами постобработки данных траверсирования. Показатели неопределённости для интегральных характеристик объектов исследования сведены в таблицу 1.



Рисунок 2 – Универсальный экспериментальный стенд ЭТ4: а) – для исследования отсеков ступеней; б) – для исследования блоков «Ступень – Диффузор – Патрубок»; в) – для исследования блоков «Ступень – Диффузор»



Рисунок 4 – Экспериментальный стенда ЭС-ОВ-ЦНД для исследований выходных патрубков



Рисунок 3 – Калибровочный стенд ТС-1М



Рисунок 5 – Пятиканальные векторные 3D пневмозонды в координатных устройствах, термоанемометр, малоинерционный датчик давления

Параметр х		Формула		Относительная
		интегральной характеристики	относительной ошибки	ошибка $\overline{s_x}$ , %
Турбинных ступеней	кпд	$\eta = \frac{N}{\dot{m} \cdot H_0} = \frac{FL}{\dot{m} \cdot H_0} \frac{\pi n}{30}$	$\overline{s_{\eta}} = \sqrt{\overline{s_F}^2 + \overline{s_n}^2 + \overline{s_m}^2 + \overline{s_{H_0}}^2}$	0,399
	Потери с выходной скоростью	$\Delta h_c = \frac{c_{c_{\rm cp}}^2 / 2}{H_0}$	$\overline{s_{\Delta h_c}} = \sqrt{\overline{s_{H_0}}^2 + 2\overline{s_c}^2}$	0,706
	Термодинамическая степень реактивности	$\rho_T = \frac{H_2}{H_0}$	$\overline{s_{\rho_T}} = \sqrt{2} \overline{s_{H_0}}$	0,288
	Коэффициент потерь в решетке турбины	$\varsigma = \frac{c_t^2 / 2 - c^2 / 2}{c_t^2 / 2}$	$\overline{s_{\varsigma}} = \sqrt{8} \overline{s_c}$	0,956
Выходные тракты	Коэффициент восстановления давления	$Cp = \frac{p_{GbLX} - p_2}{\rho_2 c_2^2 / 2}$	$\overline{s_{c_p}} = \sqrt{\overline{s_p^2}/2 + 2\overline{s_c^2} + \overline{s_p^2}}$	0,585
	Коэффициент потерь полного давления	$\xi = \frac{p_2^* - p_{Bbix}^*}{p_2^* - p_2}$	$\overline{s_{\xi}} = \sqrt{\overline{s_{p^*}^2}/2 + 2\overline{s_c^2} + \overline{s_{\rho}^2}}$	1,558
	Коэффициент потерь кинетической энергии	$\zeta = \frac{p_2^* - p_{6bix}}{p_2^* - p_2}$	$\overline{s_{\zeta}} = \sqrt{2\left(2\overline{s_c^2} + \overline{s_{\rho}^2}\right)}$	0,633
Блоков	КПД блока	$\eta_{+\mathcal{I}} = \frac{N}{\dot{m} \cdot H_{0+\mathcal{I}}} = \frac{FL}{\dot{m} \cdot H_{0+\mathcal{I}}} \frac{\pi n}{30}$	$\overline{s_{\eta}} = \sqrt{\overline{s_F}^2 + \overline{s_n}^2 + \overline{s_m}^2 + \overline{s_H}^2}$	0,399
	Относительный прирост КПД блока	$\Delta \overline{\eta}_{\mathcal{J}} = \frac{\left(\eta_{+\mathcal{J}} - \eta\right)}{\eta} = \frac{1 - \left(p_2/p_{\scriptscriptstyle Bblx}\right)^{(k-1)/k}}{1/\left(p_{\scriptscriptstyle Bblx}/p_0^*\right)^{(k-1)/k} - 1}$	$\overline{s_{\Delta\eta_{\mathcal{I}}}} = \frac{k-1}{k} \sqrt{\overline{s_{p*}}^2 + 3\overline{s_p}^2}$	0,152

Таблица 1 – Относительные неопределенности интегральных характеристик элементов проточных частей турбин по результатам опытов

Глава 3 посвящена обоснованию и разработке обобщённой методики исследования газодинамики трехмерного потока в проточных частях турбомашин, направленной в сторону взаимодействия методов численного моделирования более тесного И физического эксперимента. Основными средствами сближения расчета и эксперимента являются повышение точности измерений параметров потока и переход на новый более совершенный уровень тестирования CFD моделей. Экспериментальная база лаборатории Турбиностроения СПбПУ позволяет измерять трехмерные поля параметров потока в элементах проточных частей турбин пневмометрическим метолом с одновременным параллельным использованием термоанемометрии и малоинерционных датчиков давления. В отельных случаях применялась система PIV. Повышение точности измерений при траверсировании достигается за счет сближения условий калибровки зондов с условиями аэродинамического модельного эксперимента путем учета специфики потока в проточных частях турбин. Такой особенностью является, прежде всего, периодическая нестационарность потока за рабочим колесом турбины.

На рисунке 6 показан внешний вид модернизированного калибровочного стенда TC-1M, предназначенного для калибровки 3D пневмометрических векторных зондов в квазистационарном и в периодически нестационарном потоке.



Рисунок 6- Внешний вид калибровочного стенда ТС-1М с ГПНП: 1 – сопло; 2 – диск; спицы (120 шт. Ø 2мм); 3 –цилиндрические спицы (120 шт. Ø 2мм); 4 – вал ротора; 5 – опоры корпуса ротора; 6 – станина ГПНП; 7 - электродвигатель; 8 – ременная передача; 9 - регулятор частоты; 10 – станина измерительных приборов; 11 – подвижная платформа; 12 - поворотный стол; 13 – кронштейн для крепления малоинерционного зонда давления; 14 – координатное устройство с тарируемым пневмозондом; 15 - кронштейн для координатного устройства с пневмозондом

Информационно-измерительная система стенда TC-1M, представленная на рисунке 7, имеет два варианта конфигурации: для исследования затопленной струи стенда TC-1M и для калибрования 3D пневмометрических векторных зондов. В зависимости от конфигурации в координатном устройстве устанавливается угломер 1 (конф. 1) или пневмометрический зонд 1 (конф. 2). Выравнивание по направлению потока пневмозонда (или угломера) производится по показаниям уравнительного устройства 5. Давления от всех каналов пневмоприемника (зонда или угломера) подается на входы сканера давления 8. Туда же подаются полное давлении в выходном сечении сопла, измеряемое с помощью трубки Пито1, и полное давлении за вращающимися стержнями, измеряется трубкой Прандтля 4. Все давления передаются на вход ПК 9. Для определения параметров периодической нестационарности потока за вращающимися стержнями используется цилиндрический зонд 13 с малоинерционным датчиком давления. Синхронизация процесса измерений производится сигналом датчика оборотов 15, который через усилитель 16 подается на АЦП 17.



Рисунок 7 – Информационно-измерительная система калибровочного стенда TC-1M: 1- пневмометрический зонд (или угломер); 2 – трубка Пито1; 3 – трубка Пито2; 4 – трубка Прандтля; 5 – выравнивающее устройство; 6 – видеокамера; 7 – монитор; 8 – сканер давления Pressure System 9016; 9 – ПК с приложением ServerScanner программы FlowMaster; 10 – ПК с приложением Client программы FlowMaster; 11 – блок управления; 12 – АЦП; 13 –зонд с малоинерционным датчиком давления; 14 –усилитель сигнала зонда давления; 15 – датчик оборотов; 16 – усилитель сигнала датчика оборотов; 17 – АЦП; 18 – ПК



Калибровочные характеристики конического зонда, полученные при его калибровке в квазистационарном и в периодически нестационарном потоке, показаны на рисунке 8.

Рисунок 8 – Калибровочные характеристики конического пневмозонда в квазистационарном (пунктирные линии) и в периодически нестационарном потоке (сплошные линии): а) –  $\Pi = f(\Pi_3); \delta$ ) –  $\Delta \alpha = f(\gamma); в$ )–  $\Delta p_{4-5}/\Delta p_{\partial u H} = f(\gamma); г$ ) –  $\kappa = f(\gamma)$ 

Данные траверсирования потока в контрольном измерительном сечении за рабочим колесом были обработаны по «квазистационарным» и по «нестационарным» калибровочным характеристикам. На рисунке 9 представлены полученные результаты в виде распределений параметров потока по высоте канала. Традиционная методика проверки уровня неопределенности результатов траверсирования заключается в сравнении массового расхода, замеренного расходомерным соплом, с расходом, полученным путем численного интегрирования данных траверсирования. Результаты этой проверки показали, что благодаря уточнению калибровочных характеристик уровень неопределений на рис. 9 видно, что наибольшее расхождения наблюдаются в распределениях углов потока. Поэтому полученный эффект объясняется, прежде всего, уточнением калибровочных характеристик  $\Delta \alpha = f(\gamma)$  и

$$\Delta p_{4-5} / \Delta p_{\partial u \mu} = f(\gamma).$$



Рисунок 9 – Распределения параметров потока по высоте канала в сечении за РК, полученные по квазистационарным и периодически нестационарным калибровочным зависимостям

Центральное место в главе 3 занимает методика валидации CFD моделей по структуре потока в контрольных сечениях методом статистического анализа. Предлагаемый подход к тестированию CFD модели основан на использовании методов математической статистики и имеет следующие предпосылки. Результаты численного моделирования течения - это полностью детерминированная матрица всех параметров потока в расчетной области. Точность вычислений в идеале определяется разрядностью регистров процессора, а реально – величиной невязок, которые задаются как критерий сходимости задачи. Результаты физического эксперимента – это поля параметров потока, полученные путем траверсирования трехмерного течения в контрольных плоскостях. Измерения в каждой точке траверсирования имеют систематическую и случайную неопределенности. Систематические неопределенности устраняются применением специальной калибровки измерительной системы – 3D пневмометрических зондов, установленных в координатных устройствах. Величина случайной неопределенности определяется колебаниями режима в течение эксперимента и параметрами измерительной системы. Таким образом, для любого параметра потока R отклонение его экспериментального  $R_{ii}$  от расчетного значения  $R_{iiP}$  в сходственных точках контрольной плоскости является случайной величиной.

При условии адекватности CFD модели реальному течению матрицу относительных разностей  $\delta R_{ij} = \frac{R_{ij2} - R_{ijP}}{R_{m2}}$  можно считать генеральной совокупностью случайных отклонений

эксперимента от расчета по параметру R с нормальным законом распределения. Выборка из этой генеральной совокупности также должна иметь нормальный закон распределения. Локальные разности расчетного и экспериментального значения параметра *R* нормируются по среднему значению указанного параметра, полученному по результатам эксперимента:  $R_{cp}$ . Выдвигается гипотеза, о том, что указанная выборка подчиняется нормальному закону распределения, который характеризуется теми же параметрами (моментами распределения) что и распределения случайных ошибок измерительной системы по заданному параметру потока. Справедливость гипотезы проверяется по критерию  $\chi^2$  Пирсона.

Процедура проверки и количественной оценки степени совпадения экспериментальных и расчетных полей параметров потока заключается в следующих шагах.

- 1. Интерполяция экспериментальных полей параметров потока.
- 2. Получение выборки  $\delta R_{ij 3-P}$  из генеральной совокупности относительных отклонений эксперимента от расчета в сходственных точках контрольной плоскости.
- 3. Проверка выборки  $\delta R_{ij 3-P}$  на нормальность распределения по критерию  $\chi^2$ Пирсона.
- 4. Количественная оценка степени совпадения экспериментального и расчетного полей в случае положительного результата проверки выборки на нормальность распределения.

Для проверки выборки  $\delta R_{ii\partial - P}$  на соответствие нормальному закону распределения она группируется по *s* интервалам в пределах от  $\delta R_{ij \partial -P \min}$  до  $\delta R_{ij \partial -P \max}$ . Статистика критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона вычисляется в соответствии с соотношением:

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^{s} \frac{(n_m - n_m^0)^2}{n_m^0} , \qquad (1)$$

где  $n_m$  - эмпирические частоты попадания элементов выборки  $\delta R_{ij \mathcal{P}-P}$  в *m*-й интервал;  $n_m^0$  теоретические частоты, вычисленные по плотности нормального распределения с заданной величиной дисперсии  $\sigma^2$ .

Теоретические частоты *n*<sup>0</sup><sub>*m*</sub> вычисляют по формуле:

$$n_m^0 = N \cdot P(\sigma^2)_m,\tag{2}$$

где  $N = i \cdot j$  – объем выборки  $\delta R_{ij \ni -P}$ ,  $P_m(\sigma^2) = \int_{x_{m-1}}^{x_m} f(x, \sigma^2) dx$  - вероятность попадания в

интервал *m*,  $f(x, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$  - функция плотности центрального (µ=0) нормального распределения с дисперсией  $\sigma^2$ .

Очевидно, что теоретические частоты, а, следовательно, и критерий  $\chi^2$ , вычисленный по формуле (1), является функцией дисперсии  $\chi^2 = f(\sigma^2)$ . Минимум этой функции однозначно определяет дисперсию нормального распределения, с которым проводится сравнение распределения тестируемой выборки  $\delta R_{ij2-P}$ .

Известно, что при  $N \to \infty$  закон распределения случайной величины (1) стремится к закону распределения  $\chi^2$  с k=s-r-1 степенями свободы:  $\chi^2 \to \chi^2_k$  при  $N \to \infty$ . Здесь r – количество независимых параметров теоретического (в данном случае – нормального) закона распределения. Поскольку выборка  $\delta R_{ij} \to -P$  имеет центральное распределение, т.е. средние величины равны  $R_{ij} \to cp} = R_{ijP cp}$ , то теоретический закон имеет один параметр – дисперсию  $\sigma^2$ . Поэтому r=1 и k=s-2.

Тогда можно считать, что при заданном уровне значимости  $\alpha$  распределение случайной выборки  $\delta R_{ij \ni - P}$  подчиняется нормальному закону, если вычисленное значение  $\chi^2$  будет меньше  $\chi^2_{k\alpha}$ :

$$\chi^{2} = \sum_{m=1}^{s} \frac{(n_{m} - n_{m}^{0})^{2}}{n_{m}^{0}} < \chi^{2}_{k,\alpha}$$
(3).

Граничное значение  $\chi^2_{k,\alpha}$  определяется по таблице значений функции  $\chi^2$  при заданном уровне значимости  $\alpha$  и известном числе степеней свободы *k*.

На рисунке 10 приведен пример сопоставления расчетных и экспериментальных полей полного и статического давлений в контрольном сечении за рабочим колесом модельного блока «Ступень – Диффузор». Поля представлены в виде трехмерных пространственных поверхностей. Интерполяция и представление ее результатов выполняется разработанной автором программой TraversDataInterpol на языке AutoLISP в среде AutoCad.



Рисунок 10 – Интерполяция полей полного и статического давления в сечении за РК: а) – эксперимент; б) – CFD моделирование; в) – совмещение интерполированных экспериментальных и расчетных полей полного и статического давления

На рисунке 11 показаны экспериментальное и расчетное поля вектора скорости потока в контрольном сечении за рабочим колесом модельного блока «Ступень – Диффузор» и результат их интерполяции в программе TraversDataInterpol.

В таблице 2 представлены эмпирические (в виде гистограмм) и теоретические распределения (в виде кривых) распределения выборок относительных разностей составляющих векторов расчетного и экспериментального полей скорости потока  $\delta_{C_{z_{ij}3-P}}$ ,  $\delta_{C_{u_{ij}3-P}}$  и  $\delta_{C_{r_{ij}3-P}}$ . Размер выборок  $N = i \cdot j = 120 \cdot 32 = 3840$ , число интервалов ранжирования s = 50. В этой же таблице приведены величины статистик  $\chi^2$ , вычисленные по формуле (1). Граничное значение статистики  $\chi^2$  для  $\alpha = 0.05$  и k=48:  $\chi^2_{0.05,48} = 33.1$ . Величины стандартных отклонений определенны по условию  $\chi^2 = \chi^2_{min} (\sigma^2)$ .



Рисунок 11 – Поля вектора скорости потока  $\vec{c}_2$  в сечении 2-2 за РК: а) – эксперимент: результат траверсирования в сечении 2-2  $\vec{c}_{2,2}$ ; б) – СFD моделирование:  $\vec{c}_{2P}$  в точках траверсирования; в) - интерполяция  $\vec{c}_{2,2}$ ; г) – интерполяция  $\vec{c}_{2,P}$ ; д) – совмещение интерполированных экспериментального  $\vec{c}_{2,2}$  и расчетного  $\vec{c}_{2P}$  полей (вид по направлению вектора периферийного вихря).

Как видно из таблицы 2, по всем составляющим вектора скорости потока наблюдается выполнение условия  $\chi^2 < \chi^2_{0.05,48}$ . Следовательно, отклонения результатов расчета от эксперимента по всем составляющим вектора скорости можно считать случайным (обусловленным небольшими колебаниями режима в течение эксперимента), и значит - пренебрежимо малыми.

По результатам сопоставления полей  $\vec{c}_{29}$  и  $\vec{c}_{2P}$  дана количественная оценка совпадения их структур. Степень их совпадения может быть определена как стандартная ошибка, вычисленная по стандартным отклонениям расхождений расчетного и экспериментального полей составляющих вектора скорости потока, по формуле:

$$\overline{s} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \Big( \sigma_{\delta c_z} + \sigma_{\delta c_u} + \sigma_{\delta c_r} \Big), \tag{4}$$

где σ<sub>δc<sub>z</sub></sub>, σ<sub>δc<sub>u</sub></sub>, σ<sub>δc<sub>r</sub></sub> - стандартные отклонения выборок относительных разностей экспериментальных и расчетных составляющих вектора скорости.





Таблица 2 - Результаты валидации CFD модели по распределениям вектора скорости в контрольном сечении 2-2

В соответствии с формулой (4) для приведенного выше примера можно дать количественную оценку степени расхождения расчета и эксперимента, равную стандартной

ошибке 
$$\overline{s}_{\vec{c}} = \sqrt{2(\overline{s}_{\delta c_z} + \overline{s}_{\delta c_u} + \overline{s}_{\delta c_r})/3} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(0,093 + 0,072 + 0,055) = 0,18$$

В главе 3 также представлена методика применения корреляционного анализа результатов исследований по одномерным зависимостям и по полям распределений параметров потока. Указанная методика может с успехом применяться как для оценки степени совпадения одномерных и двухпараметрических зависимостей, так и для определения взаимосвязи явлений, представленных этими функциями. Этот же прием эффективен при определении значимых параметров, определяющих рабочие процессы в турбине.

На рисунке 12 показан пример применения корреляционной функции для оценки совпадения экспериментального и расчетного распределения осевой составляющей скорости потока в контрольном измерительном сечении за рабочим колесом турбинной ступени.

Коэффициенты корреляции, вычисленные для области основного потока, а также для областей вторичных течений, позволяют утверждать, что степень совпадения расчета с экспериментом в периферийной области примерно в 3 раза меньше, чем в основном потоке и у корня.



Рисунок 12 – Корреляция между экспериментальной и расчетной осевой составляющей скорости потока по высоте канала: а) – область периферийного течения  $k_{Cz_{\Im},Cz_{P}} = 0,336$ ; б) – область основного потока  $k_{Cz_{\Im},Cz_{P}} = 0,994$ ; в) – прикорневая область  $k_{Cz_{\Im},Cz_{P}} = 0,997$ 

На рисунке 13 представлены кривые расхождения углов вектора вихря с направлением подвихревого потока Δα и КПД\* ступени по полным параметрам в зависимости от угла выхода потока на среднем диаметре в сечении за РК.



Рисунок 13 – Расхождение углов вектора вихря с направлением подвихревого потока Δα и КПД\* в зависимости от угла выхода потока на среднем диаметре в сечении за РК

Значения коэффициентов корреляции, вычисленные для диапазонов  $\alpha_{2cp} < 78^{\circ}$  и  $\alpha_{2cp} > 78^{\circ}$  примерно равны по модулю и противоположны по знаку:  $k_{Da,K\PiД}$ =-0,9 и  $k_{Da,K\PiД}$ =-0,931. Это позволяет сделать вывод о негативном влиянии периферийной вихревой структуры на КПД\* ступени при углах  $\alpha_{2cp} < 78^{\circ}$  и о положительном ее влиянии при углах  $\alpha_{2cp} > 78^{\circ}$ .

При наличии серии опытов можно выполнять однопараметрический анализ влияния исследуемого параметра на структуру потока в контрольных измерительных сечениях. На рисунке 14 представлены поля коэффициентов корреляции трех составляющих вектора скорости потока при изменении массового расхода через модельную ступень 1.



Рисунок 14 – Поля корреляционных коэффициентов составляющих вектора скорости потока  $\vec{c}_2$ и массового расхода  $\dot{m}$  для модельной ступени 1: а) -  $k_{Cz,\dot{m}}(r,\theta)$ ; б) -  $k_{Cu,\dot{m}}(r,\theta)$ ; в) -  $k_{Cr,\dot{m}}(r,\theta)$ 

Поля корреляционных коэффициентов  $k_{Cz,m}(r,\theta)$ ,  $k_{Cu,m}(r,\theta)$  практически равномерны почти по всей площади контрольного сечения, что подтверждает очевидный факт равномерного увеличения компонентов  $c_z$  и  $c_u$  при повышении массового расхода. Поверхность  $k_{Cr,m}(r,\theta)$  имеет приблизительно линейный характер изменения в радиальном направлении и достаточно сложный в тангенциальном направлении. Следовательно, при увеличении расхода в данном случае идет перераспределение потока по высоте канала.

Исключение составляет область периферийного вихря, где коэффициент корреляции по всем составляющим вектора скорости принимает минимальное по модулю значение. Отсюда можно сделать вывод, что в пространстве, занимаемом крупномасштабными периферийными вихревыми структурами, характер влияния массового расхода неоднозначен и требует более детального изучения. Области экстремумов корреляционных поверхностей позволяют понять пространственную протяженность этого влияния.

Глава 4 посвящена обобщению и анализу экспериментальных данных по аэродинамике турбинных ступеней, выходных трактов и блоков «Ступень – Выходной тракт» различной конфигурации.

Основные параметры испытанных модельных ступеней представлены в таблице 3. Численное моделирование течения в этих ступенях выполнялось совместно с моделями их выходных трактов. CFD модели тестировались по представленной в главе 3 методике валидации по структуре потока 3D в контрольных измерительных сечениях.

По результатам экспериментально-расчетных работ было сделано обобщение влияния типа закрутки и конструкции бандажа на интегральные характеристики ступени.



На рисунке 15 показаны изменения КПД для всех исследованных ступеней в зависимости от режима нагрузки. Сравнения представленных зависимостей показывают преимущества ступеней с т.н. «обратной» закруткой. Максимальный измеренный уровень КПД\* по полным параметрам за ступенью достигает более 90% для ступеней 1 и 3. Однако такой тип закрутки приводит к более низкому уровню КПД, т.е. к повышенным потерям с выходной скоростью. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования обратной закрутки для последних ступеней, после которых следует выходной тракт с цилиндрическим корневым обводом, где происходит эффективный процесс восстановления давления.



Рисунок 15 – КПД и КПД\* в зависимости от характеристического числа  $u/C_0$ 

Все ступени, за исключением ступени 2, исследовались в блоке с выходными трактами, включающими выходной диффузор с силовыми стойками различной геометрии.

На основе данных эксперимента и вариантных расчетов, проведенных с помощью валидированных CFD моделей течения, выполнен анализ влияния формы силовых стоек в выходном диффузоре газовой турбины на эффективность его работы. На рисунке 16 представлены графики изменения коэффициента восстановления давления  $C_p$  в диффузоре в зависимости от угла потока  $\alpha_{2cp}$  во входном сечении для различных типов силовых стоек. Согласно полученным данным наиболее удачным является симметричный профиль силовой стойки с наклоном в осевом направлении:  $C_{pmax}$ =80%. Следует также отметить подобный характер полученных кривых для всех видов симметричного профиля, которые имеют характерный максимум при небольших положительных углах входа потока на среднем диаметре. Этот эффект связан с влиянием крупномасштабных вихревых структур на качество восстановительного процесса в выходном диффузоре. Интенсивность указанных структур зависит от типа бандажа (или его наличия).



Рисунок 16 – Коэффициент восстановления давления в диффузоре C<sub>p</sub> в зависимости от угла закрутки потока A<sub>2</sub> для различных типов силовых стоек

На рисунке 17 представлены графики изменения коэффициента восстановления давления по длине диффузора. Наилучшее качество восстановительного процесса ( $C_p = 0,77$ ) наблюдается для диффузора с предвключенной ступенью 1 без бандажа. При этом лучшим вариантом являются стойки симметричного профиля с осевым наклоном.



Рисунок 17 – Распределение коэффициента восстановления давления в диффузоре *С*<sub>*p*</sub> для различных типов предвключенной ступени

Результаты анализа эффективности работы блоков «Ступень – Диффузор» представлены в виде сравнительных графиков КПД ступеней и КПД блоков на рисунке 18. Согласно графику, на номинальном режиме работы наибольший выигрыш КПД блока ( $\eta_{+,\mathcal{I}} = 0,83$ ) по сравнению с КПД ступени ( $\eta = 0,71$ ) реализуется для блока со ступенью 3:  $\eta_{+,\mathcal{I}} - \eta = 0,83 - 0,71 = 0,12$ . Однако по общему уровню КПД блока он все же уступает блоку со ступенью 1:  $\eta_{+,\mathcal{I}} = 0,87$ . Это превосходство может быть объяснено более высокими значениями коэффициента восстановления давления *Cp* для модельной ступени 1:  $C_{p \ V84} = 0.80$ ,  $C_{p \ SGT5} = 0.77$ , что в свою очередь, обусловлено более интенсивными вихревыми периферийными структурами в ступени без бандажа.



Рисунок 18 – Эффективность работы блока «Ступень – Диффузор» в зависимости от характеристического числа  $u/C_0$ 

Величину положительного эффекта от установки диффузора удобно оценивать как прирост КПД блока по сравнению с КПД ступени, отнесенный к КПД ступени по формуле:

$$\Delta \overline{\eta}_{+,\mathcal{I}} = \frac{\eta_{+,\mathcal{I}} - \eta}{\eta} = \frac{\left(p_{\mathcal{I}_{obx}} / p_0^*\right)^{(k-1)/k} - \left(p_2 / p_0^*\right)^{(k-1)/k}}{1 - \left(p_{\mathcal{I}_{obx}} / p_0^*\right)^{(k-1)/k}}.$$
(5)

Величина  $\Delta \bar{\eta}_{+,\mathcal{I}}$  показывает относительный прирост КПД блока «Ступень – Диффузор» вследствие установки диффузора, т.е. даёт качественную и количественную интегральную оценку повышения эффективности блока «Ступень – Диффузор» только от установки диффузора. На рисунке 19 представлены нормированные величины прироста КПД блоков «Ступень – Диффузор» для свободной и бандажированной РЛ. Из графиков видно, что для ступеней с бандажом эффект от установки диффузора примерно в 1,5 раза больше, чем в случае ступени со свободной РЛ, и достигает 15,4%. Важно отметить, также, что максимальная выгода достигается на т.н. частичных режимах при значениях  $u/C_0 > (u/C_0)_{out}$ .



Рисунок 19 – Относительный прирост КПД  $\Delta \bar{\eta}_{+\mathcal{A}}$  блока «Ступень – Диффузор» и изменение коэффициента  $C_p$  в зависимости от характеристического числа  $u/C_0$ 

Для блоков «Ступень – Диффузор» с бандажированной РЛ были выполнены экспериментальные исследования влияния величины радиального зазора над РК на эффективность работы блока. На рисунке 20 представлены изменения интегральных характеристик ступени и блока «Ступень – Диффузор» в зависимости от величины радиального зазора над РК. Опыты проводились на номинальном режиме нагрузки ступени.



Рисунок 20 – Относительный прирост КПД ∆<sub>¬µ,д</sub> блока «Ступень – Диффузор» и изменение показателей эффективности ступени и диффузора в зависимости от величины радиального зазора над РК

Опыты показали наличие максимума КПД\*, КПД ступени и КПД блока, который достигается в модели при величине радиального зазора  $\delta = 0,63$  мм, что соответствует радиальному зазору в прототипе  $\delta = 5,37$  мм. Следует подчеркнуть, что такой эффект

характерен только для последних ступеней, за которыми следует выходной диффузор. Он достигается за счет двух противоположных тенденций: снижения КПД ступени при увеличении радиального зазора над РК и увеличением перепада энтальпий на ступень вследствие улучшения восстановительного процесса в диффузоре.

Эффективность работы выходного диффузора определяется наличием или отсутствием отрывов от периферийного и прикорневого обводов. Определяющую роль здесь играет структура потока, выходящего из последней ступени, а именно – крупномасштабные вихревые структуры (КВС), генерируемые ступенью в прикорневых и периферийных областях сечения за РЛ. Очевидно, что их характеристики зависят от типа закрутки и режима нагрузки ступени.

КВС представляют собой пространственные когерентные структуры, неподвижные в пространстве и слабо пульсирующие во времени. Это пространственные стоячие волны, образующиеся благодаря суперпозиции нескольких волновых процессов: периодически неравномерного потока из зазора над РЛ, индуктивных вихрей, генерируемых вращающейся решеткой рабочих лопаток, и периодически нестационарным потоком под КВС. На рисунке 21 представлена картина формирования КВС.

Суперпозиция первых двух волновых процессов приводит к образованию т.н. дорожки «бегущих» вихрей. Их направление совпадает с направлением вектора  $\vec{w}_2$  на периферии, а их количество равно числу рабочих лопаток. При их взаимодействии с основным потоком образуется пространственная стоячая волна – крупномасштабные вихревые структуры (КВС). Их количество равно числу направляющих лопаток, а направление их векторов определяется величиной расхождения (дивергенции) векторов вихрей КВС и основного потока под ними.

Взаимодействие подвихревого потока с потоком вихря сопровождается диссипацией энергии, величина которой тем больше, чем значительнее дивергенция углов вектора вихря и скорости потока под ним. Взаимный разворот вектора вихря и подвихревого потока по-разному влияет на устойчивость течения в периферийных областях. Для режимов с отрицательной закруткой  $A_2 < 0^\circ$  увеличение угла закрутки  $A_2$  ведет к снижению абсолютной величины закрутки потока, а для режимов  $A_2 > 0^\circ$ - к ее увеличению. В результате в периферийный областях снижается радиальный градиент давлений у периферии и повышается вероятность отрыва потока.



Рисунок 21 – Формирование квазистационарных крупномасштабных вихревых структур в периферийной области за решеткой турбинной ступени: 1- дорожка бегущих вихрей; 2 - КВС

Схематично механизм взаимодействия КВС с основным потоком и течением из зазора над РК представлен на рисунке 22. При отрицательной закрутке ( $A_2 < 0^\circ$ ) интенсивность КВС быстро убывает в осевом направлении. Кроме того, смешение двух разнонаправленных потоков у периферийного обвода приводит к образованию второго ряда быстро затухающих локальных вихревых структур (рис. 22а). При положительной закрутке ( $A_2 > 0^\circ$ ) структура КВС более устойчива и сохраняет кинетическую энергию вращения на большей протяженности в осевом направлении.





Рисунок 22 - Схема взаимодействия КВС с потоком протечки над РЛ и подвихревым потоком: a)  $A_2 = -22^\circ$ ; б)  $A_2 = +10^\circ$ 

В главе 4 также приведены результаты исследований выходных трактов «Диффузор – Патрубок» и блоков «Ступень – Диффузор - Патрубок».

На рисунке 23 представлены два варианта выходных трактов «Диффузор – Патрубок», имеющих диффузоры существенно различной конструкции.



Рисунок 23- Схемы проточных частей модельных выходных трактов «Диффузор – Патрубок»: а) – выходной тракт ЦНД; б) – выходной тракт ГТУ

Сопоставление обратного влияния для моделей ЦНД и ГТУ (рисунок 24) по результатам испытаний изолированных трактов не корректно, т.к. различны расстояния от выравнивающих решеток, где степень неравномерности равна нулю, до обсуждаемого входного сечения в тракт. Более высокая степень неравномерности для тракта ГТУ  $\zeta_{\Gamma T Y}$ =0.78 по сравнению с трактом ЦНД  $\zeta_{\text{ЦНД}}$ =0.25 – 0.4 свидетельствует только о белее раннем перестроении потока в тракте ГТУ – еще в подводящем конфузоре. Вследствие этого, а также по причине окружной

неравномерности на выходе из диффузора процесс восстановления в нем происходит с большей неравномерностью по окружности, т.е. с большим отклонением от осесимметричности. Определено влияние входных граничных условий на результаты моделировании течения в этих трактах. Даны рекомендации по их проектированию и организации исследований аэродинамики выходных трактов с односторонним отводом рабочего тела.



Рисунок 24 – Неравномерность поля скоростей во входном сечении выходного тракта для моделей ЦНД (вар.1 и вар.2) и тракта ГТУ

В главе 5 содержатся конкретные рекомендации по совершенствованию конструкций последних ступеней турбин, выходных диффузоров и выходных трактов с односторонним отводом рабочего тела.

- По результатам экспериментально-расчетных исследований ступени 2 предложена новая конструкция бандажного уплотнения и создание выходного диффузора за ступенью. По предварительным оценкам указанные мероприятия могут повысить КПД системы «Ступень – Диффузор» с 89, 5% до 91%.
- Для последних ступеней ГТУ, за которыми расположены выходные диффузоры, рекомендуется выбирать оптимальный радиальный зазор над рабочим колесом, при котором КПД системы «Ступень – Диффузор» достигает максимальной величины, превышающей КПД блока с минимальным зазором над РК примерно на 2.0÷2.5%.
- Проектирование и выбор типа закрутки для рабочего колеса последней ступени ГТУ следует проводить обязательно совместно с выходным трактом. Для турбины, после которой установлении осевой выходной диффузор с цилиндрической втулкой, «обратная закрутка» лопаточного аппарата обеспечивает безотрывное течение в диффузоре в широком диапазоне изменения режимов нагрузки турбины, а, следовательно, существенно улучшает процесс восстановления давления и КПД блока «Ступень – Диффузор».
- Длину выходных диффузоров при необходимости можно сократить за счет специального профилирования его конической части примерно на 25% от общей длины, т.к. основной процесс восстановления давления (до 90% от *С*<sub>*p*ид</sub>) происходит в кольцевом диффузоре и в первой половине конического диффузора.
- В конструкции выходных трактов «Диффузор Патрубок» следует исключить внутренние элементы жесткости и ребра, обеспечивающие перераспределение потоков в сборной камере. Обеспечение жесткости более целесообразно выполнять за счет наружного оребрения сборной камеры, а перераспределение расхода в ней – за счет оптимизации осевой ее ширины и формы.
- Экспериментальные исследования выходных трактов «Диффузор Патрубок» показали, что эти конструкции необходимо испытывать только с предвключенной последней ступенью

турбины. В том случае, если подобное моделирование невозможно, ступень следует заменять по возможности эквивалентным аэродинамическим сопротивлением.

• Все рекомендации основаны на данных экспериментальных исследований и углубленного анализа структуры потока, выполненного по результатам численного моделирования с помощью валидированных CFD моделей.

#### Заключение

- 1. Разработаны основные мероприятия по сближению практики применения расчетных и экспериментальных методов исследования аэродинамики проточных частей турбин. Определяющими из этих мероприятий являются повышение точности аэродинамического эксперимента за счет учета трехмерности и периодической нестационарности течения в проточных частях турбомашин и повышение уровня достоверности результатов численного моделирования с помощью совершенствования методов валидации CFD моделей.
- 2. Представлены детальное изложение особенностей конструкции экспериментальных стендов лаборатории Турбиностроения СПБПУ и также подробное описание их автоматизированных информационно-измерительных систем. Определены и систематизированы данные по величинам относительных неопределенностей измеряемых параметров потока и вычисляемых аэродинамических характеристик.
- 3. Произведена модернизация экспериментального калибровочного стенда TC-1M и создана новая методика калибровки пневмометрических пятиканальных векторных 3D-зондов в периодически нестационарном потоке, моделирующем течение за рабочими лопатками турбин в пределах изменения параметров калибровочной струи по числу Maxa 0.1<*M*<0.9, по частоте 0<*f*<1.32 кГц, по углу скоса -25°<γ<35°.
- 4. Представлена обобщённая методика траверсирования трехмерного потока в проточных частях турбомашин с учетом периодической нестационарности течения за рабочим колесом. Установлено, что учет периодической нестационарности потока в калибровочных характеристиках зондов улучшает качество траверсирования, т.к. снизился уровень неопределенности с 2,5% до 0,37%, по сравнению с результатами, полученными по квазистационарным калибровочным характеристикам.
- 5. Разработана и зарегистрирована компьютерная программа обработки результатов траверсирования потока в контрольных сечениях проточных частей турбомашин, включающая в себя процедуру перехода через 3-х параметрические калибровочные зависимости, полученные в периодически нестационарном потоке.
- 6. Создана методика валидации CFD моделей по структуре потока в контрольных сечениях методами статистического анализа, в рамках которой разработан и зарегистрирован комплекс компьютерных программ для интерполяции и пространственного представления полей параметров потока в дозвуковой области течения в пределах изменения числа *M* до 0,9.
- 7. На основе комплекса расчетно-экспериментальных работ выполнено обобщение результатов исследований аэродинамики турбинных ступеней с различными законами закрутки, блоков «Ступень Диффузор» и «Ступень Диффузор Патрубок». Экспериментальные исследования выполнялись в диапазонах изменения режимов от 50% до 120% от номинальной нагрузки последней ступени. Максимальный уровень эффективности был получен для ступеней с «обратной» закруткой. Эффективность ступени со свободной РЛ (ступень 1) КПД\*=92,5% и КПД=80%. Максимальный относительный прирост КПД вследствие установки диффузора имеет ступень с бандажом (ступень 3) Δη
  <sub>+,π</sub> = 15,4%.
- 8. По результатам обобщения даны практические рекомендации по проектированию ступеней и выходных трактов турбомашин, а также по валидации их CFD моделей в расчетных исследованиях.

# СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1. Семакина, Е.Ю. Оптимизация выходного патрубка ЦНД мощной паровой турбины на базе экспериментальных исследований. / Семакина, Е.Ю., Лисянский А.С. // Научно-технические ведомости СПбПУ.- СПб. 2012.- № 2-1 (147).- С. 48-56.
- Семакина, Е. Ю. Экспериментальные и численные исследования структуры 3D-потока в отсеке «Турбинная ступень - осевой диффузор». / М. С. Зандер, Е. Ю. Семакина, В. А. Черников // Научно-технические ведомости СПбГПУ.- СПб. 2013 - № 1 (166) С. 197-203.
- 3. Семакина, Е. Ю. К вопросу о численном моделировании трехмерного течения в выходном диффузоре газовой турбины. / А. И. Кириллов, Е.Ю. Семакина [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ.-СПб. 2015.- № 4 (231).- С. 30-35.
- 4. Семакина, Е. Ю Аэродинамические процессы в выходном тракте стационарной газовой турбины. / Семакина, Е. Ю., Хоанг, Ч. В. Черников В. А. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер.: Естественные и инженерные науки.- 2017.- Т. 23, № 3.- С. 49-60.
- 5. Семакина, Е. Ю. Особенности структуры потока в турбинной ступени реактивного типа. / В. А. Черников, Е. Ю. Семакина // Теплоэнергетика, ежемесячный теоретический и научно-практический журнал / Российская академия наук. Российское научно-техническое общество энергетиков и электротехников. -М. 2017.-№ 4.-С. 57-64.
- 6. Семакина, Е. Ю. Пульсации давления в потоке и вибрация деталей выходных трактов ГТУ. / Е. Ю. Семакина, В. А. Черников, А. И. Суханов. // Научно-технические ведомости СПбПУ = St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology. Сер.: Естественные и инженерные науки / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого .— Санкт-Петербург., 2017. Т. 23, № 2. С. 28-40. : схемы, ил., граф., табл., диагр. (Энергетика). ISSN 2542-1239.
- 7. Семакина, Е.Ю. Квазистационарное численное моделирование потока в ступени большой циркуляции с использованием результатов традиционных экспериментальных исследований и последующим внедрением инновационного эксперимента. / Исупов, В. Ю., Семакина, Е.Ю., Черников, В.А. [и др.] // Неделя науки СПбГПУ. Лучшие доклады : материалы научно-практической конференции с международным участием, 3-8 декабря 2012 года / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; [отв. ред.: В. Э. Гасумянц, Д. Д. Каров]. Санкт-Петербург, 2013. С. 23-26. (Прикладные разработки и моделирование в области инженерных наук). Библиогр.: с. 26.
- 8. Семакина Е.Ю., Экспериментальные аэродинамические исследования выходного тракта двухвальной ГТУ мощностью 100 МВт. / Черников В.А., Семакина Е.Ю., В.Ч. Хоанг. // Теплоэнергетика. Паротурбинные, газотурбинные парогазовые установки и их вспомогательное оборудование. 2019. № 6. С. 1–11.
- Семакина, Е.Ю. Энергетические машины. Измерение вектора скорости и параметров потока в турбомашинах: учебное пособие для студентов специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели» / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, - 2009. - 48 с.
- Семакина, Е. Ю. Энергетические машины. Проектирование направляющих и рабочих лопаточных аппаратов энергетических турбомашин : учеб. пособие. / А. С. Ласкин, Е. Ю. Семакина // Санкт-Петербургский государственный политехнический университет СПб. : Издво Политехн. ун-та, 2011.-102 с.
- 11. Семакина, Е. Ю. Выходные тракты турбин [Электронный ресурс]: Методика экспериментального исследования и численного моделирования: учебное пособие / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра

Великого, Институт энергетики и транспортных систем, Кафедра "Турбины, гидромашины и авиационные двигатели".— Санкт-Петербург, 2015.— <URL:http://elib.spbstu.ru/dl/2/7704.pdf>.

- Семакина, Е. Ю. Методика калибровки пневмозондов для измерения параметров 3D потока в проточных частях турбомашин [Электронный ресурс]: учебное пособие. / В. А. Черников, Е. Ю. Семакина // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Электрон. текстовые дан. (1 файл : 2,26 Мб) Санкт-Петербург, 2017.
- Семакина, Е. Ю. Колебания и вибропрочность энергетических турбомашин [Электронный ресурс]: учебное пособие. / А. С. Ласкин, Е. Ю. Семакина // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Электрон. текстовые дан. (1 файл : 5,01 Мб) Санкт-Петербург, 2018
- 14. Семакина, Е. Ю. Аэродинамические характеристики выходного диффузора стационарной газовой турбины при различных режимах её работы / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Энергетические машины и установки. - 2009. - N 2. - С. 42 – 48.
- 15. Семакина Е.Ю. Информационно-измерительная система аэродинамического стенда для исследования потока в проточной части отсека «ступень-диффузор» и некоторые результаты испытаний на модели мощной газовой турбины / В.А. Черников, Е.Ю.Семакина и др. // Энергетические машины. 2009. № 1 (5). С.24–34.
- Семакина, Е. Ю. Обоснование нестандартной геометрии выходного тракта ЦНД паровой турбины на примере К-300-240-2 ЛМЗ. / В.А. Черников А.Д. Брекоткина, Е.Ю. Семакина, П.Н. Броднев. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета Выпуск 5. 2020, с. 5-13.
- 17. Семакина, Е. Ю. Теоретические исследования применения выходного диффузора газовой турбины в качестве пароперегревателя парового контура комбинированной парогазовой установки. / В.А. Черников, Э.Л. Китанин, Е.Ю. Семакина, Е.Э. Китанина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета ВИГЭУ №5, 2020, с.26-37
- 18. Семакина, Е. Ю. Парогазовая установка с охлаждаемым диффузором. / В.А. Черников, Э.Л. Китанин, Е.Ю.Семакина, Е.Э. Китанина // Патент РФ №2715073, 25.02.2020.
- 19. Семакина Е.Ю.Программа для ЭВМ TraversDataInterpol Интерполяция и 3D представление полей параметров потока. Свидетельство о государственной регистрации №2020614726 от 24.04.2020.
- 20. Семакина, Е.Ю. Программа для ЭВМ TraverseDataProcessing Переход через калибровочные зависимости и осреднение параметров потока по данным траверсирования в контрольных измерительных сечениях. Свидетельство о государственной регистрации №2020614778 от 24.04.2020.
- 21. Семакина, Е.Ю. Программа для ЭВМ FlowExpert Программа для управления и регистрации данных аэродинамического эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации №2020614859 от 24.04.2020.
- 22. Семакина, Е.Ю. Камера отбора теплофикационной паровой турбины. / Ласкин А.С. Суханов А.И. Грань В.Н., Пясик Д.Н., Сутулов Н.П., Гавра Ю.П., Семакина, Е.Ю. // Авторское свидетельство №1216379, кл. F 01 D 25/30, 1983
- 23. Семакина, Е.Ю. Интеграционный подход к организации лабораторных и практических занятий по специальности "Информационные системы в технике и технологиях". / Семакина, Е.Ю., Кац, Б.А. // Материалы IX Международной научно-методической конференции "Высокие интеллектуальные технологии образования и науки", 14 15 февраля 2002 года / Международная акад. наук высш. школы; СПбГТУ и др. СПб, 2002.
- 24. Семакина, Е.Ю. Стенд для экспериментальных исследований аэродинамики выходного тракта двухвальной турбины ГТУ Д-класса / Семакина Е.Ю., Хоанг Ч.В., Черников В.А. / В сборнике:

Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сборник научных статей по итогам четвертой международной научной конференции. // С. 54-56, 2019

- 25. Семакина, Е. Ю. Эрозионный износ элементов трубопроводов ТЭС и АЭС: Расчет и техническая диагностика. / Семакина Е.Ю., Аксенов, В. И. // СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. 109 с.
- 26. Семакина, Е. Ю. Aerodynamic studies of a combined turbine-stage-exhaust system / Semakina E., ChernikovV., Mimic D., Jaetz C., Seume J. / В сборнике:35th Anniversary of cooperation./ Results of joint research activity of scientists from Peter the Great Sankt-Petersburg polytechnic university and Leibniz universitaet Hannover // c. 84-89, 2019
- 27. Семакина, Е. Ю. Влияние входных граничных условий на аэродинамические характеристики выходного тракта двухвальной ГТУ / Семакина Е.Ю., Хоанг Ч.В., Черников В.А. / В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем // с. 104-106, 2018
- 28. Семакина, Е. Ю. Разработка методики калибровки 3D зондов в нестационарном потоке / Семакина Е.Ю., Заломнов А.И., Лисицкий А.М., Черников В.А. / В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем // с. 144-146, 2018
- 29. Семакина, Е. Ю. Методология экспериментального исследования газодинамики блоков «Ступень – Диффузор – Патрубок» и некоторые результаты испытаний / Семакина Е.Ю., Иванов В.О., Черников В.А. / В сборнике: Материалы научной конференции. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ // с. 107-109, 2015
- 30. Семакина, Е. Ю. Оптимальный радиальный зазор рабочего колеса турбинной ступени в блоке с осевым диффузором / Семакина Е.Ю., Гуленков М.Б., Черников В.А. / В сборнике: Материалы научной конференции. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ // с. 86-87, 2015
- 31. Семакина, Е. Ю. Универсальный стенд для экспериментальных исследований аэродинамики выходных и переходных трактов стационарных турбин в блоке с турбинными ступенями: методика и результаты экспериментов / Черников В.А, Семакина Е.Ю./ Газотурбинные технологии // № 7 (134) с. 32-37, 2015.
- Семакина, Е.Ю. Анализ задач и архитектур систем вибротермоконтроля [Электронный ресурс] / В.А. Цветков, Е.Ю. Семакина / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Межвузовская научно-техническая конференция, Неделя науки. Санкт-Петербург 2005.
- 33. Семакина, Е.Ю. Разработка блока логических преобразований на ПЛИС "Actel" комплекса технологических защит турбины и турбопитательных насосов Калининской АЭС [Электронный ресурс] / Е.И. Страхов, Е.Ю. Семакина XXXIV неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов/ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, СПб.2006.
- 34. Семакина, Е.Ю. Программное обеспечение для автоматизации системы сбора и обработки информации аэродинамического эксперимента [Электронный ресурс] / Д.В. Желябов, Е.Ю. Семакина XXXIV неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвузовской научнотехнической конференции студентов и аспирантов/ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, СПб.
- 35. Мониторинг теплотехнических параметров на базе ОРС технологии [Электронный ресурс] / В.А. Цветков, Е.Ю. Семакина / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Межвузовская научно-техническая конференция, Неделя науки Санкт-Петербург 2004.