

На правах рукописи



Епифанов Андрей Андреевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ  
В РЕШЕТКАХ И СТУПЕНЯХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН ЛПИ

Специальность: 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Теоретические основы теплотехники».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кириллов Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
кафедры «Турбинные двигатели  
и установки» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»  
Ласкин Александр Степанович  
кандидат технических наук, инженер-  
конструктор ОАО «Климов», г. Санкт-  
Петербург, Садовникова Татьяна Юрьевна

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное  
объединение по исследованию  
и проектированию энергетического  
оборудования им. И.И. Ползунова»  
(ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «13» ноября 2012 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гл. корп., ауд. 130.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан «3» октября 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Талалов В.А.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Малорасходные турбины ЛПИ находят широкое применение в различных областях техники: в наземном и морском транспорте, в специальной технике, в малой энергетике, в качестве привода нагнетателей, насосов и иного оборудования. Такие турбины компактны и сравнительно просты в изготовлении.

Отличительная особенность малорасходных турбин – малые углы выхода сопловой и малые углы входа рабочей решеток, большие углы поворота в рабочей решетке, большие безразмерные шаги решеток, малые безразмерные длины лопаток. Турбины ЛПИ срабатывают повышенный перепад энтальпий в малом числе ступеней при повышенной экономичности. Течение в малорасходных турбинах – транс- и сверхзвуковое.

В основе разработанного класса малорасходных турбин ЛПИ лежат результаты многолетних стендовых исследований, которые продолжаются на кафедре ТДУ и сегодня. Вместе с тем стендовые испытания – не единственный в настоящее время способ отработки проточных частей турбин. Достигнутые за последние годы успехи в развитии вычислительной гидродинамики позволяют существенно сократить долю экспериментальных и доводочных работ при исследовании решеток и ступеней турбомашин. Программные комплексы вычислительной гидродинамики, ориентированные, в частности, на численное моделирование течения в проточных частях турбомашин, позволяют в короткие сроки и с меньшими трудозатратами получить детальную информацию о структуре течения и определить интегральные характеристики турбины.

**Цель работы** – детально изучить возможности программного комплекса ANSYS CFX и настроить его для расчета течения в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ. Поскольку результаты работы предполагается использовать для усовершенствования процесса проектирования малорасходных турбин ЛПИ, локальные и интегральные характеристики решеток и ступеней должны рассчитываться с приемлемой для инженерных целей точностью.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи исследования**:

- изучить свойства выбранного газодинамического комплекса применительно к моделированию течения в малорасходных турбинах ЛПИ;
- отработать методические вопросы постановки численного эксперимента применительно к моделированию течения в решетках малорасходных турбин;
- верифицировать расчет обтекания сопловых и рабочих решеток малорасходных турбин в широком диапазоне чисел Маха по опытным данным;
- исследовать влияние способов сопряжения течения в сопловой и рабочей решетках в составе малорасходных ступеней на структуру течения и интегральные характеристики ступеней;
- верифицировать рекомендуемую методику газодинамического расчета малорасходной одноступенчатой турбины ЛПИ по опытным данным;
- дать примеры использования отработанной методики трехмерных расчетов при проектировании и совершенствовании малорасходных турбин ЛПИ.

**Предмет исследования** – малорасходные турбинные решетки и ступени конструкции ЛПИ, их локальные и осредненные газодинамические характеристики при двумерном и трехмерном обтекании потоком вязкого газа с дозвуковыми, трансзвуковыми и сверхзвуковыми скоростями.

**Метод исследования** – численное моделирование двумерного и трехмерного течения вязкого газа в среде программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS CFX.

**Научная новизна работы** состоит в том, что впервые выполнено систематическое исследование возможностей программного комплекса ANSYS CFX применительно к задаче численного моделирования течения газа в малорасходных турбинах ЛПИ, конструкция которых отличается от турбин традиционного типа. Сформулированы рекомендации по выбору вычислительных опций, обеспечивающих приемлемую для инженерных целей погрешность расчета не более  $\pm 1$  %.

**Практическая ценность работы.** Показано, что численное моделирование турбулентного течения газа в малорасходных турбинах ЛПИ с помощью программного комплекса ANSYS CFX не уступает по точности определения их локальных и интегральных характеристик экспериментальным данным. Поэтому использование материалов диссертации при проектировании малорасходных турбин позволит ускорить проектные работы и сократить затраты на экспериментальные исследования.

Разработанная методика расчета использована при проектировании и совершенствовании турбин Р-2.6-0.85/0.15 П, Р-3.15-1.28/0.2 П, Р-3.7-1.28/0.2 П, Р-4.7-1.08/0.15 П, предназначенных для привода питательных насосов на Черниговской, Ново-Кемеровской, Иркутской и Красноярской ТЭЦ соответственно.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации доложены и положительно оценены на международной научно-практической конференции «XL Неделя науки СПбГПУ» (СПб, 2011), на секции ПТ, ГТ и ПГ установок НТС ОАО «НПО ЦКТИ» (СПб, 2012), на семинаре кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ (СПб, 2012), на конференции «ANSYS в энергетике» (СПб, 2012), на совместном заседании кафедр СПбГПУ «Турбинные и двигательные установки» и «Теоретические основы теплотехники» (СПб, 2012), на XIV международной научно-технической конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (Харьков, 2012).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 работ (из них 2 работы в журналах Перечня ВАК).

**Достоверность** результатов численного моделирования течения в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ обусловлена корректным моделированием особенностей течения в проточных частях указанных турбин и подтверждена удовлетворительным соответствием их расчетных характеристик данным стендовых и натурных испытаний.

**Личный вклад** диссертанта состоит в постановке задач исследования, в проведении расчетов, в анализе полученных данных, в разработке методиче-

ских рекомендаций по расчету течения в малорасходных решетках и ступенях в среде программного комплекса ANSYS CFX, участия в проведении тепловых испытаний паровой турбины конструкции ЛПИ Р-2.6-0.85/0.15 П на Черниговской ТЭЦ (Украина).

**На защиту выносятся:**

– рекомендации по выбору вычислительных опций (расчетные сетки, граничные условия, модели турбулентности) для моделирования течения в решетках и ступенях малорасходных турбин в среде программного комплекса ANSYS CFX;

– рекомендации по сопряжению течения в неподвижной (сопловой) и вращающейся (рабочей) решетках малорасходных турбин ЛПИ;

– результаты сопоставления верификационных расчетов характеристик малорасходных решеток, выполненных в широком диапазоне чисел Маха, с опытными данными;

– результаты сопоставления верификационных расчетов характеристик одноступенчатой турбины ЛПИ, выполненных в широком диапазоне режимов работы, с опытными данными;

– результаты проектных расчетов характеристик усовершенствованного варианта паровой турбины Р-2.6-0.85/0.15 П конструкции ЛПИ по разработанной методике и их сопоставление с данными натурных испытаний на Черниговской ТЭЦ (Украина).

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, списка обозначений, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 76 наименований. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, включая 82 иллюстрации и 1 приложение.

## **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи исследования и основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В **главе 1** дано описание проточной части малорасходных турбин конструкции ЛПИ, разработанной в 70-х гг. прошлого века группой сотрудников кафедры «Турбиностроение» под руководством проф. И.И. Кириллова\*.

Рассмотрены особенности лопаточного аппарата малорасходных турбин. Обсуждаются основные подходы к численному моделированию турбулентного течения применительно к малорасходным турбинам ЛПИ.

Сделан выбор в пользу экономного с точки зрения затрат вычислительного времени RANS-подхода, приемлемого для расчета характеристик малорасходных турбин с инженерной точностью. Обоснована целесообразность использования программного комплекса ANSYS CFX.

**Глава 2** посвящена методическим вопросам постановки численного эксперимента при исследовании плоских и кольцевых решеток малорасходных турбин ЛПИ: влиянию расчетной сетки, модели турбулентности, входной интенсивности турбулентности, неоднородности потока на входе в решетку и положения плоскости осреднения за решеткой.

Методические исследования трех сопловых ( $\alpha_{1л} = 3.1 \dots 4.8^\circ$ ,  $t/B = 4.4 \dots 8.7$ ,  $l/B = 0.6 \dots 1.2$ ) и трех рабочих ( $\beta_{1л} = 8.3 \dots 14^\circ$ ,  $\beta_{2л} = 8.3 \dots 15.1^\circ$ ,  $t/B = 1.2 \dots 1.5$ ,  $l/B = 1.7$ ) решеток малорасходных турбин в широком диапазоне чисел Маха (0.7...1.8) показали, что для расчета обтекания в программном комплексе ANSYS CFX достаточно использовать неструктурированные умеренно подробные расчетные сетки (200...400 тыс. узлов на одну кольцевую решетку) и моделировать турбулентность RANS-подходом с замыкающей моделью турбулентности SST-CC, содержащей поправку на кривизну линий тока и вращение.

Выбранные для исследования решетки покрывают диапазон геометрических и газодинамических параметров, характерных для лопаточного аппарата малорасходных турбин ЛПИ.

---

\* Рассохин В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Энергомашиностроение. Труды СПбГПУ, № 491. Изд. Политехнического университета, СПб, 2004. – с. 152–161.

**Малорасходная сопловая решетка №1** ( $\alpha_{1Л} = 3.1^\circ$ ,  $t/B = 4.4$ ,  $l/B = 0.6$ )

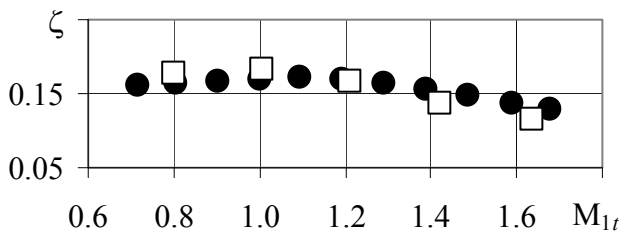


Рис. 1. Зависимость коэффициента полных потерь в сопловой решетке №1 в зависимости от  $M_{1t}$ : ● – эксперимент; □ – расчет

на стенде кафедры ТДУ исследована без рабочей решетки. Это позволило получить опытные значения коэффициента полных потерь без учета дополнительных потерь, возникающих вследствие обратного влияния рабочей решетки на сопловую.

Все особенности постановки физического эксперимента были смоделированы в ANSYS CFX, и вычисленные коэффициенты полных потерь удовлетворительно совпали с опытными значениями во всем диапазоне чисел Маха (рис. 1). Расчетные значения коэффициента потерь в двух других малорасходных сопловых решетках также удовлетворительно согласуются с опытными величинами.

На стенде кафедры ТДУ малорасходная рабочая решетка №43 ( $\beta_{1Л} = 8.3^\circ$ ,  $\beta_{2Л} = 8.3^\circ$ ,  $t/B = 1.5$ ,  $l/B = 1.7$ ) испытывалась в составе ступени. Стенд оснащен контрольно-измерительными приборами для траверсирования

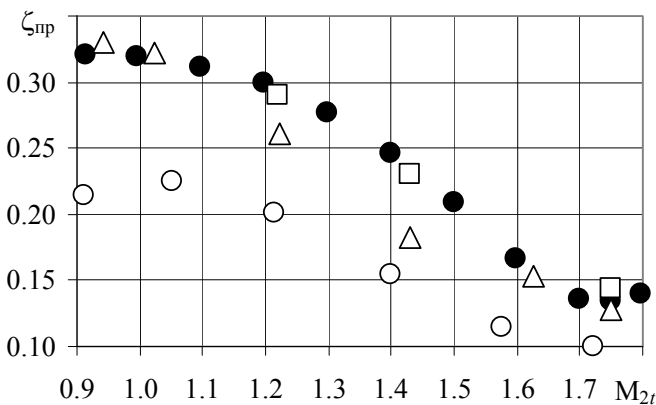


Рис. 2. Суммарный коэффициент профильных потерь в рабочей решетке в зависимости от  $M_{2t}$ : ● – эксперимент; ○ – однородный поток на входе; △ – неоднородный поток на входе; □ – потери с учетом нестационарности

потока в среднем по высоте сечении кольцевой рабочей решетки. По данным траверсирования были вычислены экспериментальные значения коэффициентов потерь в рабочей решетке.

Для верификации расчета профильных потерь в решетке по опытными данным (рис. 2) потребовалось учесть влияние нестационарного натекания на рабочую решетку неоднородного по шагу сопловой решетки потока. С этой целью был использован способ сопряжения течения Frozen Rotor (см. гл. 3).



Из рис. 2 следует, что неоднородность потока, создаваемая сопловыми лопатками, существенно увеличивает потери в рабочей решетке: на дозвуковых и трансзвуковых режимах разница составляет 0.06...0.1, на сверхзвуковых режимах – около 0.04. С учетом потерь от нестационарности экспериментальные и расчетные данные удовлетворительно согласуются между собой. Расчетные характеристики коэффициента потерь в двух других малорасходных рабочих решетках также удовлетворительно совпали с опытными значениями.

В главе 3 рассмотрены методические вопросы постановки численного эксперимента при исследовании малорасходных турбинных ступеней конструкции ЛПИ. При моделировании течения в ступени наиболее сложным является сопряжение параметров потока при переходе от абсолютного движения (течения в сопловой решетке) к относительному (течению в рабочей решетке). Для моделирования взаимного влияния решеток в программном комплексе ANSYS CFX в зазоре между лопаточными венцами размещают искусственную поверхность сопряжения параметров при переходе потока от абсолютного движения к относительному.

В программном комплексе ANSYS CFX реализованы три способа сопряжения течения. Два из них, Stage и Frozen Rotor, предусматривают расчет стационарного течения, а третий, Transient Rotor Stator, – нестационарного течения. Методические исследования течения в типовых малорасходных ступенях турбин ЛПИ в широком диапазоне геометрических ( $\alpha_{1Л} = 5...9^\circ$ ,  $\beta_{1Л} = 7...14^\circ$ ,  $\beta_{2Л} = 7...15^\circ$ ) и режимных ( $M_{c1} = 0.8...1.8$ ,  $M_{w1} = 0.9...1.4$ ) параметров позволили выявить основные достоинства и недостатки трех способов сопряжения.

При расчете кольцевой решетки рабочего колеса способом Stage на поверхности сопряжения выполняется осреднение в окружном направлении параметров потока, определяющих входные граничные условия. При этом в относительном движении решетка рабочих лопаток обтекается искусственно сформированным осесимметричным стационарным потоком. Способ Stage является наиболее экономичным из трех способов, т.к. независимо от соотношения чисел сопловых и рабочих лопаток позволяет ограничиться расчетом одного ка-

нала как в сопловой, так и в рабочей решетках. Расчет одного режима на сетке с 1.2 млн. узлов способом Stage на персональном компьютере с процессором *i5*, тактовой частотой 2.7 ГГц и оперативной памятью 16 Гб занимает в среднем около 2 часов.

Как показали наши расчеты, способом Stage не рекомендуется рассчитывать течение в ступени, если угол выхода сопловой решетки  $\alpha_{1Л} \leq 5^\circ$  и число Маха за сопловой решеткой  $M_{c1} \geq 1.3$ , из-за возникновения артефактных всплесков потерь у поверхности сопряжения (рис. 3, *a*, область *A*). В таких случаях стационарное течение в сопловой и рабочей решетках рекомендуется сопрягать способом Frozen Rotor.

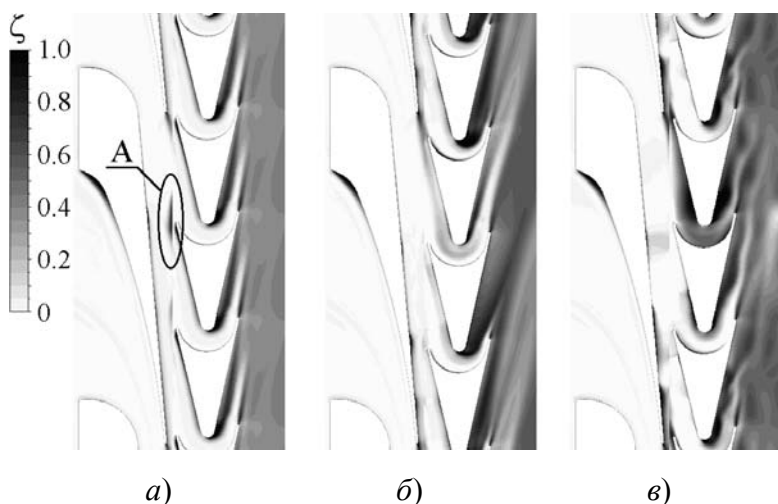


Рис. 3. Поля локальных коэффициентов потерь в венцах ступени с  $\alpha_{1Л} = 5^\circ$ , полученные в расчетах способами сопряжения Stage (*a*), Frozen Rotor (*б*) и Transient Rotor Stator (*в*)

все межлопаточные каналы ступени.

Для уменьшения числа каналов с целью сокращения времени счета профили скорости (и распределения других консервативных величин) приходится масштабировать в окружном направлении, что, конечно, вносит дополнительную погрешность. Однако наши оценки показали, что при разнице длин расчетных областей сопловой и рабочей решеток в окружном направлении менее

При сопряжении способом Frozen Rotor поток проходит поверхность сопряжения без осреднения в окружном направлении. С уменьшением общего кратного  $K$  числа сопловых и рабочих лопаток расчетная область чрезмерно увеличивается. При  $K = 1$  (что часто встречается в реальных конструкциях) она охватывает

5 % дополнительная погрешность от масштабирования не превышает погрешности вычисления интегральных характеристик ступени\*.

Для того чтобы, пользуясь способом Frozen Rotor, получить осредненное влияние неоднородности поля скорости в межвенцевом зазоре на обтекание решеток необходимо выполнить расчеты при различных взаимных положениях сопловых и рабочих лопаток.

Опыт расчетов показал, что удовлетворительный по точности результат достигается уже после трех расчетов. При этом входную кромку рабочей лопатки следует размещать на расстоянии около  $1/6$  шага рабочей решетки справа и слева от аэродинамического следа, сходящего с сопловой лопатки, а также устанавливать в положение, соответствующее направлению следа примерно в середину межлопаточного канала рабочей решетки.

Расчет одного режима способом Frozen Rotor на сетке с 2.1 млн. узлов занимает порядка 6 часов.

Нестационарный расчет способом Transient Rotor Stator проводился с шагом по времени около  $5 \cdot 10^{-6}$  с, что соответствует 40 взаимным положениям сопловой и рабочей решеток за цикл смещения рабочей лопатки на величину шага сопловой решетки.

Время расчета одного режима способом Transient Rotor Stator на сетке с 2.1 млн. узлов достигает 14 суток.

В качестве примера рассмотрим интегральные характеристики типовой малорасходной ступени с углом выхода сопловой решетки  $9^\circ$  (рис. 4).

При малых  $u/C_0$  различие в потерях в сопловой решетке, полученных расчетом способами Stage и Frozen Rotor, составляет 0.02 при общем уровне потерь около 0.06 (рис. 4, а).

По мере увеличения  $u/C_0$  разница в потерях снижается до 0.003. По расчетам нестационарного течения в ступени способом Transient Rotor Stator, потери в сопловой решетке увеличились в среднем на 0.02 на всех режимах.

---

\* Вопрос о влиянии масштабирования решеток на точность расчета их аэроупругих характеристик требует специального изучения.

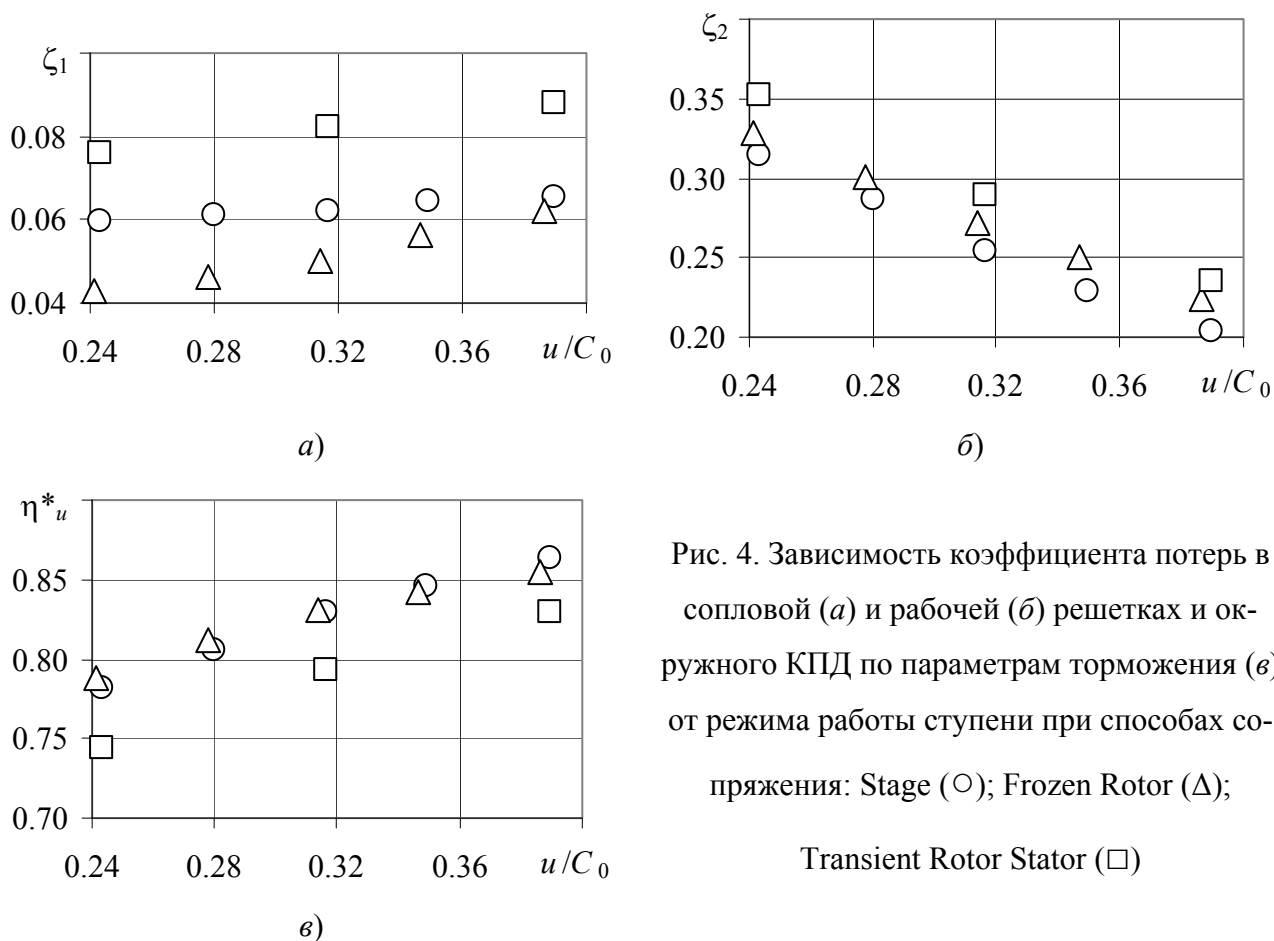


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь в сопловой (а) и рабочей (б) решетках и окружного КПД по параметрам торможения (в) от режима работы ступени при способах сопряжения: Stage (○); Frozen Rotor (Δ); Transient Rotor Stator (□)

Коэффициент потерь в рабочей решетке, полученный способом Frozen Rotor, оказывается в среднем на 0.02...0.03 выше, чем полученный способом Stage (рис. 4, б). Это связано с тем, что при сопряжении течения способом Frozen Rotor неоднородный поток без окружного осреднения попадает на рабочую решетку. Дополнительные потери от нестационарности, проявившиеся в расчетах способом Transient Rotor Stator, увеличили потери в рабочей решетке на 0.02...0.04.

Окружной КПД ступени (рис. 4, в), определенный по параметрам торможения, при расчете стационарного течения способами Stage и Frozen Rotor практически совпал. Это связано с тем, что по расчету способом Stage потери в сопловой решетке оказываются чуть большими, чем по расчету способом Frozen Rotor, и, наоборот, потери в рабочей решетке, рассчитанные способом Frozen Rotor, немного выше, чем способом Stage. По расчетам нестационарного течения способом Transient Rotor Stator дополнительные потери от нестационарности снизили КПД ступени на 0.03...0.05.

Верификация расчета по опытным данным проведена для одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ. Верификация выполнена путем сравнения расчетных характеристик турбины с данными стендовых испытаний, полученными на модернизированном и оснащенной системой сбора и обработки экспериментальных данных стенде ЭТ-3М кафедры ТДУ.

Ступень турбины состоит из сопловой ( $\alpha_{1Л} = 5^\circ$ ,  $t_1 / B_1 = 3.8$ ,  $l_1 / B_1 = 0.6$ ,  $z_1 = 24$ ) и рабочей ( $\beta_{1Л} = 7.3^\circ$ ,  $\beta_{2Л} = 7.3^\circ$ ,  $t_2 / B_2 = 1.7$ ,  $l_2 / B_2 = 0.9$ ,  $z_2 = 75$ ) решеток. С целью снижения протечек и повышения эффективности работы ступени в ее конструкции предусмотрено развитое корневое осерадиальное уплотнение. Между периферией рабочих лопаток и стенкой корпуса предусмотрен радиальный зазор 0.5 мм. Для снижения осевого усилия на подшипники диск рабочего колеса изготовлен с разгрузочными отверстиями. Для корректной верификации эти конструктивные особенности одноступенчатой турбины моделировались.

Из экспериментальных данных было известно, что уровень чисел Маха за сопловой решеткой на всех режимах не превышал 1.28. Исходя из этого, решетки соплового аппарата и рабочего колеса можно было сопрягать способом Stage, не опасаясь артефактных явлений в плоскости сопряжения. К рассчитанным в стационарной постановке величинам коэффициентов потерь в решетках соплового аппарата и рабочего колеса добавлялась поправка на величину потерь от нестационарности, известная из расчета способом Transient Rotor Stator обтекания геометрически сходной малорасходной ступени с углом выхода сопловой решетки  $5^\circ$ .

В соответствии с опытными данными турбина рассчитывалась в диапазоне изменения чисел оборотов рабочего колеса  $n = 2000 \dots 8000$  об/мин и давлений торможения перед сопловой решеткой  $p^*_0 = 0.2 \dots 0.42$  МПа, при неизменной температуре торможения на входе  $T^*_0 = 323$  К и неизменном противодавлении  $p_2 = 0.103$  МПа.

На рис. 5, 6 показана структура потока на номинальном режиме работы ступени ( $p^*_0 = 0.3$  МПа,  $n = 6000$  об/мин). В целом, структура потока в ступени вполне согласуется с общими представлениями о характере течения в турбинах.

Никаких вычислительных артефактов или явлений, противоречащих физической сути, не обнаружено. Расчетные значения внутреннего КПД турбины удовлетворительно согласуются с опытными значениями в широком диапазоне изменения режимных параметров (рис. 7).

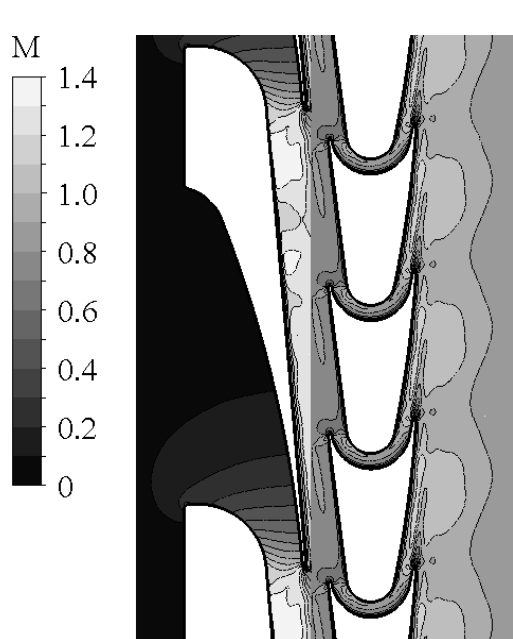


Рис. 5. Поле числа Маха в среднем сечении ступени

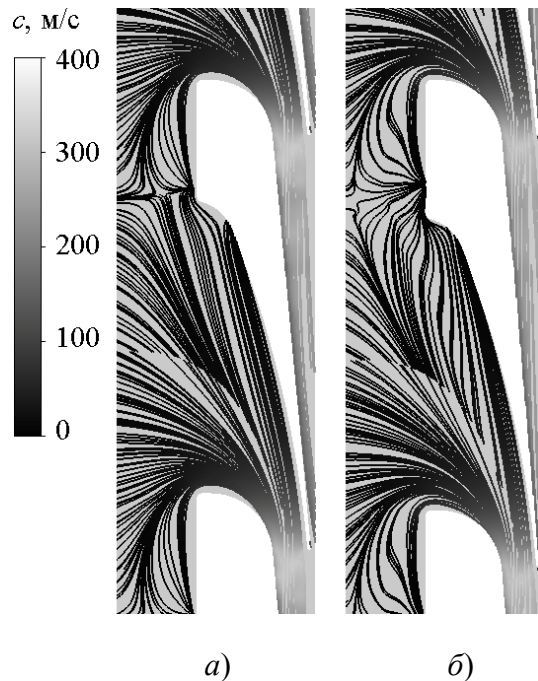
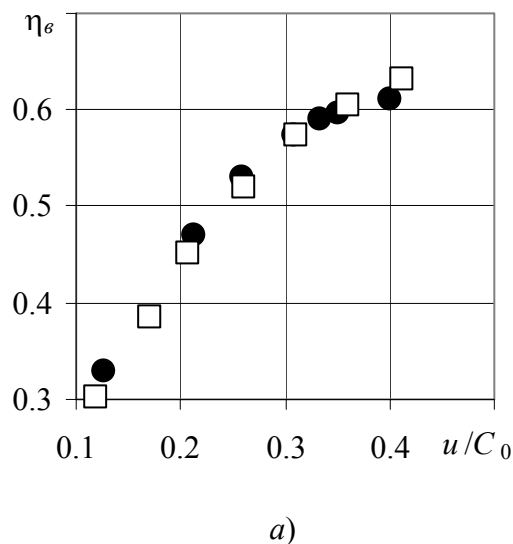
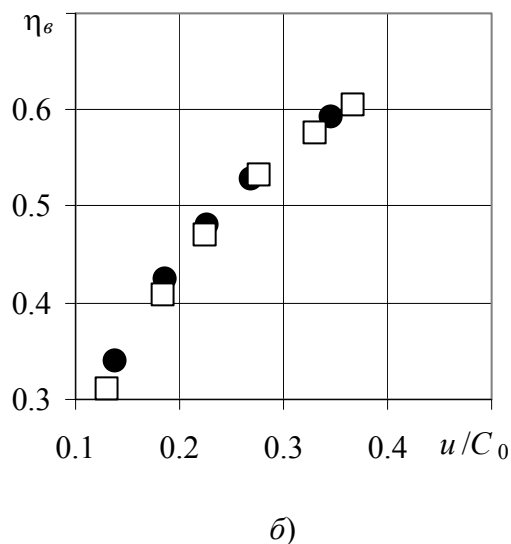


Рис. 6. Линии тока у корня (а) и у периферии (б) соплового канала



а)



б)

Рис. 7. Зависимость внутреннего КПД турбины от режима работы при давлении перед сопловой решеткой  $p^*_0 = 0.3$  МПа (а) и 0.42 МПа (б): эксперимент (●); расчет (□)

**Глава 4** посвящена приложению разработанной методики трехмерного расчета к проектированию малорасходных турбин конструкции ЛПИ.

Компактные и высокоэкономичные ступени ЛПИ применяются, в частности, в проточной части турбоприводов питательных насосов на ТЭЦ с поперечными связями, замещая электрические приводы. Такое решение экономически выгодно, т.к., кроме снижения потребления электроэнергии на собственные нужды и более экономичного регулирования производительности насосов, ТЭЦ получает возможность отпускать дополнительное количество электроэнергии и теплоты внешним потребителям за счет увеличения расхода пара в коллектор производственного отбора и сброса отработанного пара турбоприводов питательных насосов в коллектор теплофикационного отбора.

До недавнего времени турбины конструкции ЛПИ рассчитывались только в одномерной постановке. Разработанная методика трехмерного моделирования в среде программного комплекса ANSYS CFX позволила улучшить качество проектирования проточных частей малорасходных турбин. В результате комплексных одномерных и трехмерных расчетов течения, для ТЭЦ с поперечными связями разработана линейка паровых турбин (турбоприводов) номинальной мощностью 2 600...4 700 кВт, предназначенных для привода питательных насосов с номинальной подачей 380...720 м<sup>3</sup>/ч. Три турбопривода (Р-2.6-0.85/0.15 П, Р-3.15-1.28/0.2 П, Р-3.7-1.28/0.2 П) сданы в эксплуатацию и работают на Черниговской, Ново-Кемеровской и Иркутской ТЭЦ, соответственно, турбопривод Р-4.7-1.08/0.15 П находится на стадии пуско-наладочных работ на Красноярской ТЭЦ. Расчетные характеристики турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П номинальной мощностью 2 700 кВт подтверждены по данным тепловых испытаний на Черниговской ТЭЦ.

## **Заключение**

1. Методические, тестовые и прикладные исследования показали возможность численного моделирования трехмерного турбулентного потока в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ в среде программного комплекса ANSYS CFX на основе уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS-подход). Такое моделирование обеспечивает расчет локальных и инте-

гральных характеристик решеток и ступеней в приемлемые сроки и с достаточной точностью, способствуя сокращению объемов экспериментальных исследований и сроков проектирования турбин.

2. Основные рекомендации по расчету сводятся к следующему:

2.1. При постановке численного эксперимента вопрос сеточного влияния нужно решать в тесной связи с выбором модели турбулентности. При обеспеченной сеточной независимости решения можно уверенно использовать высокорейнольдсовую модель турбулентности SST-CC и неструктурированные умеренно подробные (около 200...300 тыс. узлов на плоскую решетку) сетки с элементами в виде тетраэдров в ядре потока и со слоями из призматических элементов вблизи твердых поверхностей.

2.2. Течение в сопловой и рабочей решетках можно сопрягать способом Stage, если угол выхода сопловой решетки  $\alpha_{1л} > 5^\circ$  или если число Маха за сопловым аппаратом  $M_{c1} < 1.3$ . В остальных случаях при использовании способа Stage у поверхности сопряжения в зазоре между лопаточными венцами могут возникать артефактные всплески потерь, поэтому рекомендуется использовать способ сопряжения Frozen Rotor.

2.3. К рассчитанным в стационарной постановке величинам потерь энергии в сопловой и рабочей решетках необходимо – хотя бы с помощью поправок – прибавить потери от нестационарности, которые определены на основании методических расчетов стационарного и нестационарного течений в типовых малорасходных ступенях с углом выхода сопловой решетки 5 и 9° в диапазоне  $u/C_0 = 0.19...0.39$ .

3. По отработанной методике рассчитано течение в трех сопловых и трех рабочих малорасходных решетках. Расчетные значения коэффициентов потерь в решетках удовлетворительно согласуются с опытными значениями в широком диапазоне чисел Маха.

4. Положительный опыт применения программного комплекса ANSYS CFX применительно к малорасходным решеткам позволил выполнить верификационный расчет течения в одноступенчатой турбине конструкции ЛПИ. Для



корректного сопоставления расчетных и опытных характеристик внутреннего КПД и массового расхода турбины потребовалось моделировать все ее конструктивные особенности (уплотнения, разгрузочные отверстия и др.). При таком моделировании расчетные и опытные характеристики удовлетворительно согласуются между собой.

5. Разработанная методика трехмерного моделирования в малорасходных ступенях в среде программного комплекса ANSYS CFX позволила повысить внутренний КПД спроектированной малорасходной турбины конструкции ЛПИ примерно на 2 %.

6. В результате комплексного (одномерного и трехмерного) расчета при проектировании проточной части, разработана линейка паровых турбин (турбоприводов) номинальной мощностью 2 600...4 700 кВт, предназначенных для привода питательных насосов с номинальной подачей 380...720 м<sup>3</sup>/ч. Три турбопривода (Р-2.6-0.85/0.15 П, Р-3.15-1.28/0.2 П, Р-3.7-1.28/0.2 П) сданы в эксплуатацию и работают на Черниговской, Ново-Кемеровской и Иркутской ТЭЦ, соответственно, турбопривод Р-4.7-1.08/0.15 П находится на стадии пусконаладочных работ на Красноярской ТЭЦ. Расчетные характеристики турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П номинальной мощностью 2 700 кВт подтверждены по данным тепловых испытаний на Черниговской ТЭЦ.

## **Публикации по теме диссертации**

### *Статьи в журналах Перечня ВАК*

1. Елифанов А.А. Расчет характеристик лопаточных решеток малорасходных турбин / Елифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 1–2012, с. 50–55.
2. Елифанов А.А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / Елифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. // Науч-

но-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 1–2012, с. 65–70.

*Статьи в научных изданиях*

3. Епифанов А.А. Расчет трехмерного течения вязкого сжимаемого газа в решетке профилей с помощью программы ANSYS CFX / Епифанов А.А., Титенский В.И., Галеркин Ю.Б. // XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010, с. 21–23.
4. Епифанов А.А. Опыт численного моделирования обтекания решеток малорасходных турбин ЛПИ / Епифанов А.А., Рассохин В.А., Кириллов А.И. // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, с. 45–46.
5. Епифанов А.А. Опыт численного моделирования структуры течения и характеристик ступеней малорасходных турбин ЛПИ / Епифанов А.А., Рассохин В.А., Кириллов А.И. // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, с. 47–48.

*Статьи на электронных носителях*

6. Епифанов А.А. Расчеты трехмерных трансзвуковых течений в малорасходных турбинных ступенях ЛПИ / Епифанов А.А., Галаев С.А., Кириллов А.И. // Матер. конф. «ANSYS в энергетике» СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 11-12 апреля 2012 г. [CD-диск].
7. Гринман М.И. Проектирование турбоприводов питательных насосов на базе малорасходных турбин ЛПИ / Гринман М.И., Епифанов А.А. // Матер. XIV международной научно-технической конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» Украина, Харьковская обл., 24-29 сентября 2012 г. [CD-диск].