На правах рукописи

Нгуен Ан Куанг

ВЛИЯНИЕ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАКЛОНА ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРУ ПОТОКА ОСЕВОЙ ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лапшин Кирилл Леонидович

Официальные оппоненты: **Гаев Валерий Дмитриевич**
доктор технических наук,
Публичное акционерное общество «Силовые машины — ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург, главный специалист по паровым турбинам
Сайченко Александр Сергеевич
кандидат технических наук,
Акционерное общество «РЭП Холдинг», г. Санкт-Петербург, ведущий инженер-конструктор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (http:/www.spbstu.ru).

Автореферат разослан «____»_____2019 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В условиях острой конкуренции на рынке энергетического оборудования главная проблема при проектировании тепловых (паровых и газовых) турбин – суметь добиться повышения их эффективности и надежности. Для решения указанной проблемы необходимо совершенствовать способы проектирования проточных частей турбин. В последнее время с этой целью широко применяется тангенциальный наклон лопаточных венцов турбинной ступени. Тангенциальный наклон направляющих лопаток (ТННЛ) в некоторых случаях позволяет повысить экономичность турбинной ступени за счет снижения градиента степени реактивности. Тангенциальный наклон рабочих лопаток (ТНРЛ) применяется по соображениям прочности для повышения надежности их работы, позволяя компенсировать изгибные напряжения, которые действуют на РЛ со стороны потока пара (газа).

Программные комплексы вычислительной гидродинамики по сравнению с экспериментальными исследованиями позволяют быстрее и с минимальными трудозатратами определить характеристики и структуру потока турбинной ступени. Прежде чем их использовать для усовершенствования процесса проектирования, следует убедиться, что локальные и интегральные характеристики турбинных ступеней вычисляются с достаточной для инженерных расчетов точностью. Поэтому необходимо проводить настройку используемого 3D программного комплекса путем сравнения результатов расчетов с результатами качественных экспериментов, проведенных на модельных и натурных турбинных ступенях. ANSYS – один из самых распространенных универсальных вычислительных комплексов. В этой связи представляется актуальным исследование влияния тангенциального наклона лопаточных венцов на характеристики и структуру потока осевой турбинной ступени с помощью вычислительного комплекса ANSYS.

Цель и задачи работы

Целью работы является изучение влияния ТННЛ и ТНРЛ на характеристики, структуру потока и градиент степени реактивности осевой турбинной ступени, исследование влияния ТНРЛ на напряжения в РЛ осевой турбинной ступени и создание оптимальной (в рамках выполненных исследований) турбинной ступени с ТННЛ.

Задачи исследования:

1) Проведение 3D проверочных газодинамических расчетов для осевых турбинных ступеней с отрицательным за счет применения ТННЛ градиентом степени реактивности, определение их характеристик и структуры потока с помощью программы ANSYS CFX, используемой в качестве виртуального стенда.

2) Изучение физической картины течения потока газа в турбинной ступени с отрицательным за счет применения ТННЛ градиентом степени реактивности.

3) Разработка способов рационального проектирования осевой турбинной ступени с отрицательным за счет применения ТННЛ градиентом степени реактивности.

4) Исследование влияния ТНРЛ на характеристики, структуру потока и градиент степени реактивности в осевой турбинной ступени.

5) Изучение влияния ТНРЛ на напряжения в РЛ осевой турбинной ступени с помощью программ Fluent и Static Structural, входящих в вычислительный комплекс ANSYS.

6) Анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по их практическому применению.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Впервые изучена 3D картина течения в турбинных ступенях со значительным ($\delta_c = 23^\circ$) ТННЛ не только в меридианной (*r*-*z*), но также и тангенциальной (*r*-*u*) плоскостях.

2) Впервые предложена и численно исследована рекомендация (нарастающий вдоль радиуса эффективный угол $\alpha_{1эф}$ решеток профилей), позволяющая в турбинной ступени со значительным ($\delta_c = 23^\circ$) ТННЛ добиться выполнения условия $\alpha_1 = const$ вдоль радиуса за НЛ.

3) Впервые систематически численно исследовано влияние ТНРЛ на характеристики, структуру потока и градиент степени реактивности осевой турбинной ступени.

4) Впервые доказано, что ТНРЛ является одним из способов воздействия на градиент степени реактивности в турбинной ступени.

5) Разработана и численно реализована методика, позволяющая в пакете ANSYS определять напряжения, возникающие в корневом сечении РЛ как без учета аэродинамических нагрузок, так и с учетом аэродинамических нагрузок.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что в диссертации доказана возможность и целесообразность использования программы ANSYS CFX в качестве виртуального стенда. Ее применение позволило:

- изучить 3D картину течения в 9-ти турбинных ступенях, в том числе в 4-х - с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным за счет применения значительного ($\delta_c = 23^\circ$) ТННЛ, из них в 2-х ступенях не только в меридианной (*r*-*z*), но также и тангенциальной (*r*-*u*) плоскостях, разработать рациональные способы проектирования таких ступеней;

- исследовать в 5-ти ступенях обычного типа, без ТННЛ, влияние ТНРЛ на характеристики, структуру потока, градиент степени реактивности и напряжения в РЛ;

- предложить оптимальную (в рамках выполненных исследований) конструкцию турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности.

Метод исследования. Работа была проведена с использованием численно-экспериментальных (вычислительная газодинамика) метода, тестируемого на качественном эксперименте, полученном на воздушной турбине. Расчетные модели исследуемых осевых турбинных ступеней не имели стреловидности и построены с помощью программных средств вычислительного комплекса ANSYS.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Области исследований диссертации соответствуют областям научной специальности 05.04.12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки», именно:

п.2. Физические исследования и математическое моделирование рабочего ресурса турбомашин и комбинированных турбоустановок;

п.4. Математическое моделирование и исследование динамики и прочности элементов и деталей турбомашин и комбинированных турбоустановок.

Личный вклад автора состоит в следующем:

1) Анализ публикаций по применению тангенциального наклона лопаточных венцов в осевой турбинной ступени.

2) Создание трехмерных расчетных моделей 9-ти турбинных ступеней и проведение на них численных экспериментов с использованием программы ANSYS CFX в качестве виртуального стенда.

3) Разработка методики вычисления напряжений, возникающих в корневом сечении РЛ под влияние ТНРЛ и аэродинамических нагрузок при использовании вычислительного комплекса ANSYS.

4) Анализ, обобщение и публикация полученных результатов, рекомендации по их практическому применению, написание диссертации.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие:

1) Обоснование возможности и целесообразности применения программы ANSYS CFX в качестве виртуального стенда.

2) Результаты численных расчетов суммарных характеристик (КПД и степени реактивности) на разных режимах работы и траверсирования (на оптимальных режимах) параметров потока по высоте лопатки для осевых турбинных ступеней с тангенциальным наклоном лопаточных венцов.

3) Измерение напряжений, возникающих в корневом сечении РЛ под влиянием ТНРЛ и аэродинамических нагрузок.

4) Рекомендации по практическому применению тангенциального наклона лопаточных венцов в осевой турбинной ступени.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена тестированием и настройкой программы ANSYS CFX, применяемой в

диссертации в качестве виртуального стенда, за счет использования результатов качественного эксперимента, полученного на воздушной турбине.

Апробация результатов работы

Ключевые результаты диссертации обсуждались на следующих конференциях:

1) XLIII Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 1 – 6 декабря 2014 г., тема доклада: «Применение аэродинамического пакета ANSYS CFX для определения характеристик турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности».

2) XLV Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 14 – 19 ноября 2016 г., тема доклада: «Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на характеристики осевой турбинной ступени».

3) XLVII Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, СПбПУ, 19 – 24 ноября 2018 г., тема доклада: «Влияние тангенциального наклона на напряжения в рабочих лопатках осевой турбинной ступени».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 113 страницах, содержит 53 рисунка, 5 таблиц, список литературы, включающий 68 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется актуальность темы диссертации, формулируются: цели и задачи исследований, научная новизна, принятый метод исследований, теоретическая и практическая значимость, достоверность и обоснованность полученных результатов, апробация результатов, представлены структура и объем диссертации.

В первой главе разъясняется, с какой целью в практике турбиностроения применяется турбинная ступень со сниженным градиентом степени реактивности, приведены способы снижения градиента степени реактивности, в том числе рассмотрены достоинства и недостатки ступени с ТННЛ. Выполнен обзор результатов исследований этих ступеней, а также обзор исследований по применению ТНРЛ в осевой турбинной ступени.

По результатам анализа применения тангенциального наклона лопаточных венцов в осевых турбинных ступенях поставлены задачи, которые необходимо решать в диссертации.

Вторая глава посвящена тестированию виртуального стенда. Для этого привлекалась аэродинамическая программа ANSYS CFX, с помощью которой создан виртуальный стенд, и дано краткое описание экспериментальной воздушной турбины Ленинградского политехнического института (ЛПИ), ныне

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, а также полученных на ней результатов.

Для создания виртуального стенда [5, 6], геометрия направляющих и рабочих лопаток и основные характеристики исходной, оригинальной турбинной ступени 1 с отрицательным градиентом степени реактивности за счет применения значительного ($\delta_c = 23^\circ$) ТННЛ и незакрученными РЛ были взяты из опытов в ЛПИ. Такая сложная ступень была выбрана намеренно, с целью наглядно и выпукло выявить влияние ТННЛ. Расчетная модель ступени 1 с отрицательным градиентом степени реактивности построена с помощью программ Geometry, TurboGrid и CFX (Turbomachinery), которые входят в вычислительный комплекс ANSYS. Для упрощения решения 3D аэродинамических задач исследовалась турбинная ступень без радиального зазора над РЛ. Внутренний КПД ступени определялся на основе окружного КПД, с привлечением эмпирических формул по влиянию радиального зазора. Расчетная модель турбинной ступени 1 состоит из трех направляющих и двух рабочих лопаток. Расчетная сетка для турбинной ступени 1 с отрицательным градиентом степени реактивности содержит 4754052 узла, в том числе в области направляющего аппарата (НА) – 26226065 и в области рабочего колеса (РК) – 2127987. Вблизи поверхностей, обтекаемых потоком, обеспечено сгущение сетки для корректного расчёта параметров потока в пограничном слое. Заданы следующие граничные условия: полное давление потока $P_0^* = 0{,}137$ МПа и полная температура потока $T_0^* = 368$ К на входе в ступень, и на выходе из ступени – давление в потоке $P_2 = 0{,}1033$ Мпа. Свойства рабочего тела (воздух) приняты такими же, как в опытах в ЛПИ. Задача решалась как стационарная методом *Steady State*. Для численного моделирования поля потока в ступени была применена универсальная модель турбулентности $k - \varepsilon$.

Степень неравномерности потока перед РК составляет примерно 3%, поэтому кромочные следы НЛ перед РЛ практически исчезают. При такой неравномерности потока в 3D расчетах вполне обоснованно можно применить метод *Stage*. Число Маха M_{C_1} по скорости C_1, полученное в программе ANSYS CFX при оптимальном значении параметра $\frac{u}{C_0} = 0{,}58$, равно 0,54. Такое число Маха близко к числу Маха в эксперименте ($M_{C_1} = 0{,}55 \div 0{,}6$).Числа Рейнольдса в расчетах и опытах были практически одинаковыми.

На рисунке 1 показаны суммарные характеристики турбинной ступени 1 (внутренний КПД и степени реактивности у корня и у периферии) на разных режимах при изменении частоты вращения ротора. Видно, что оптимальное значение $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt}$ для экспериментального внутреннего КПД равно 0,62, а для

расчетного внутреннего КПД – 0,58. Отличие между максимумами экспериментального и расчетного КПД практически отсутствует.

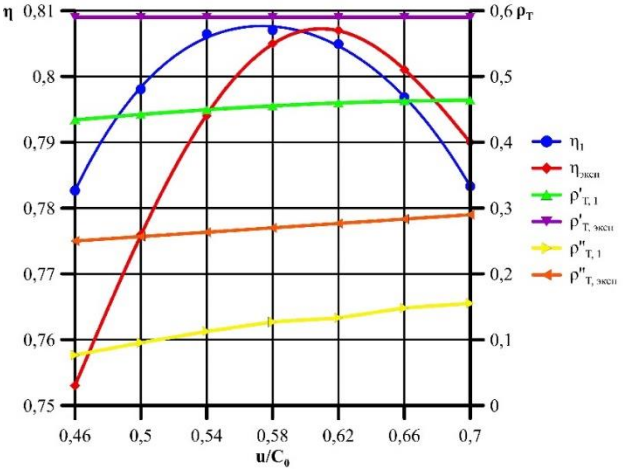

Рисунок 1. Суммарные характеристики турбинных ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности.

За счет применения значительного ТННЛ в ступени 1 степень реактивности у корня больше, чем у периферии, т.е. градиент степени реактивности вдоль радиуса – отрицателен. Расчетная степени реактивности ρ_{TC} на среднем радиусе примерно на 16% меньше экспериментальной .Увеличение степени реактивности ρ_{TC} в экспериментах объясняется наличием радиального зазора над РЛ и поэтому ростом потерь в РК из-за появления концевого вихря, что приводит и к увеличению оптимального значения параметра $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt}$.

Максимальное отличие между проектировочной, 3D расчетной [6] и экспериментальной разностями $\Delta\rho_T = \rho_T^{''} - \rho_T^{'}$ степеней реактивности турбинной ступени 1 на всех режимах достигает всего примерно 2%, что наглядно иллюстрирует качество методик, используемых на всех этапах исследований.

Траверсирование параметров потока по высоте лопатки, как и в эксперименте, выполнено на оптимальном режиме на раздвинутом варианте турбинной ступени 1 (осевой межвенцовый зазор – 20 мм вместо 8 мм).

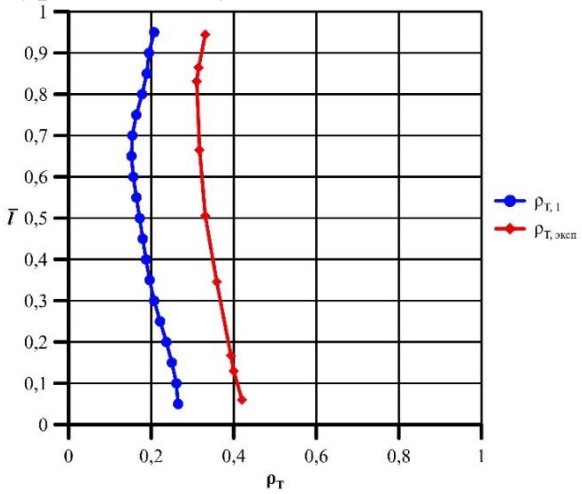

Рисунок 2. Степени реактивности по высоте лопатки.

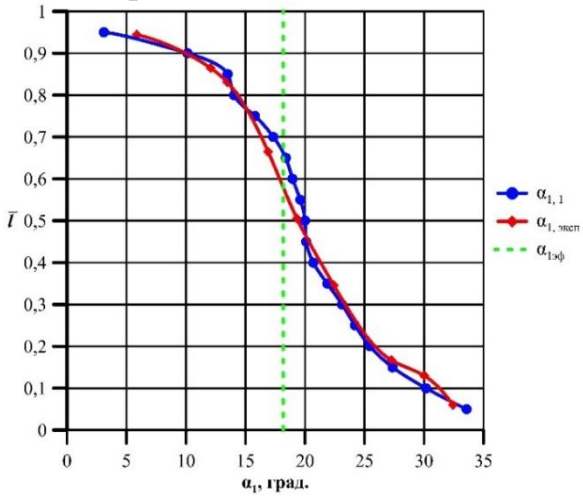

Рисунок 3. Угол α_1 по высоте лопатки.

Изменение степени реактивности по высоте лопатки на режиме траверсирования получилось нелинейным, а градиент степени реактивности увеличился по сравнению со сдвинутым (8 мм) вариантом. На рисунке 2 видно, что экспериментальная степень реактивности примерно на 16 % больше расчетной вследствие наличия в опытах радиального зазора над РЛ.

Углы α_1 потока заметно отличаются от эффективных углов $\alpha_{1эф} = const$ вдоль радиуса, что типично для ступеней с ТННЛ [4]. Это отклонение тем существеннее, чем меньше градиент степени реактивности. На рисунке 3 видно, что расчетные и экспериментальные углы α_1 почти совпадают друг с другом.

Картина траверсирования остальных расчетных параметров по высоте лопатки представлена в диссертации и также получилась близкой к экспериментальным данным.

Вполне удовлетворительное совпадение результатов 3D расчетов с экспериментом для оригинальной турбинной ступени 1 с отрицательным градиентом степени реактивности за счет применения значительного ($\delta_c = 23^\circ$) ТННЛ дало основание уверенно использовать программу ANSYS CFX в дальнейшем в качестве виртуального стенда.

В третьей главе изложены результаты изучения физической картины течения газа в осевых турбинных ступенях с ТННЛ, а также результаты исследования способов рационального проектирования НЛ в турбинных ступенях с ТННЛ.

Для изучения физической картины течения газа в осевых турбинных ступенях с ТННЛ, кроме турбинной ступени 1, выполнено исследование еще турбинной ступени 2 с «интегральными» НЛ [6]. В срединной части НЛ ступеней 1 и 2 одинаковы, а у корня и на периферии линии центров радиусов скругления выходных кромок профилей НЛ ступени 2 плавно выведены на направление радиуса (рисунок 7). РК у ступеней 1 и 2 одинаково.

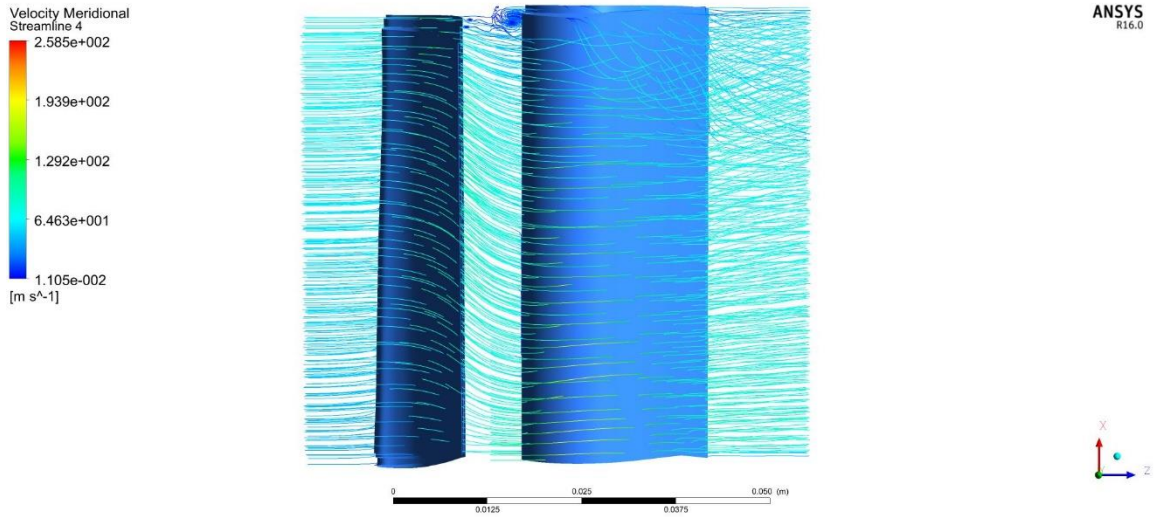

Рисунок 4. Меридианные линии тока в турбинной ступени 1.

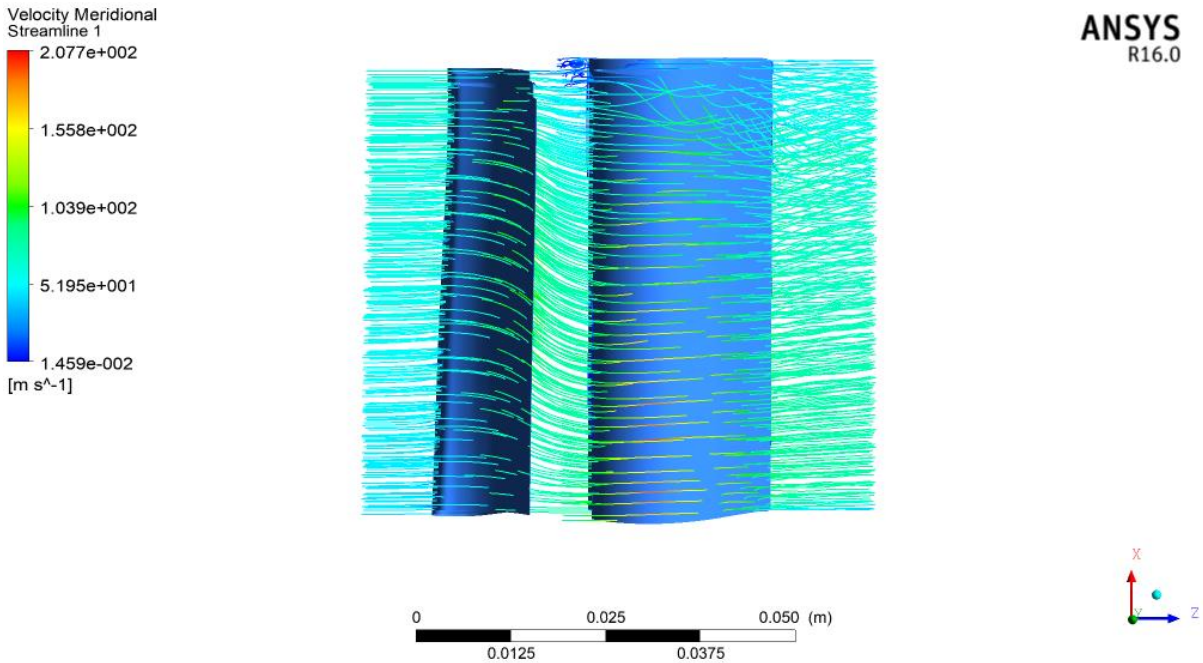

Рисунок 5. Меридианные линии тока в турбинной ступени 2.

На рисунках 4 – 5 представлены меридианные линии тока в турбинных ступенях 1 и 2. Как известно, в турбинных ступенях обычного типа ($C_u r = const$, $\alpha_1 = const$) в цилиндрических меридианных обводах проточной части меридианные линии тока не только в межвенцовых зазорах, но и в областях лопаточных венцов практически совпадают с образующими цилиндрических поверхностей, соосных с осью *z* турбины.

А в исследуемых турбинных ступенях с ТННЛ и «интегральными» НЛ меридианные линии тока в осевом зазоре между НЛ и РЛ искривлены выпуклостью к оси турбины *z*. Такое искривление линий тока под влиянием центробежных сил инерции вызывает снижение градиента давления $\frac{\partial p_1}{\partial r}$ вплоть до отрицательного в закрученном потоке за НА. Изменение градиента давления $\frac{\partial p_2}{\partial r}$ в потоке за РК обычно невелико по высоте лопатки. По указанным причинам степень реактивности в ступенях 1 и 2 у корня становится больше, чем у периферии.

В периферийной области перед РК в турбинной ступени 2 зона циркуляционного вихря и следующая за ней зона отрывного течения у периферии РЛ меньше (по площадям зон), чем у турбинной ступени 1. Это объясняется тем, что в турбинной ступени 2 в зоне стыка НЛ с периферийным обводом формируется более благоприятное течение, чем в турбинной ступени 1.

На рисунках 6 – 7 представлены конфигурации линий тока в турбинных ступенях, которые приходят из каналов НЛ (по 3 линии) на окружности у корня, на среднем и периферийном радиусах в сечении 1-1. Верхние линии приходят с

вогнутой, нижние – с выпуклой поверхности, средние – из ядра потока. Для среднего радиуса эти три линии тока внутри каналов НЛ формируют поверхность тока, почти перпендикулярную перу НЛ. На корневом и периферийном радиусах для ступени 1 такая картина течения под влиянием цилиндрических меридианных обводов проточной части хоть и менее ярко, но качественно сохраняется.

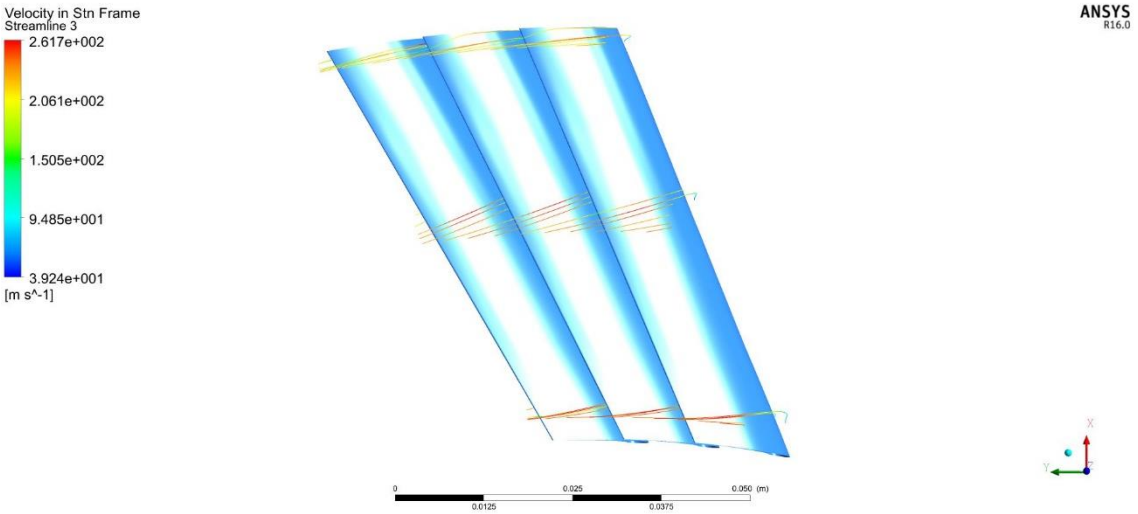

Рисунок 6. Кривые линий тока в каналах НЛ на трех радиусах в турбинной ступени 1.

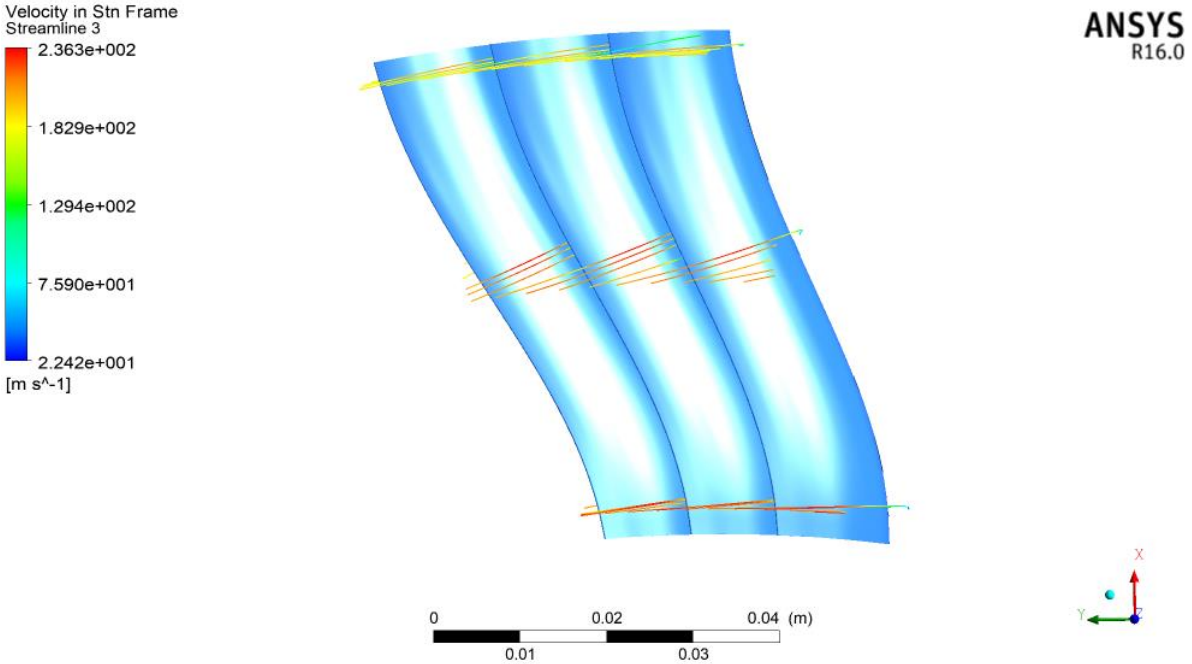

Рисунок 7. Кривые линий тока в каналах НЛ на трех радиусах в турбинной ступени 2.

В турбинной ступени 2 с «интегральными» НЛ на среднем радиусе, как и в турбинной ступени 1, три линии тока внутри каналов между НЛ формируют поверхности тока, почти перпендикулярные перу НЛ. А на корневом и периферийном радиусах в турбинной ступени 2, как и в турбинной ступени обычного типа, без ТННЛ, три линии тока формируют внутри каналов поверхности тока, почти совпадающие с осесимметричными поверхностями. Это объясняется тем, что линии центров радиусов скругления выходных кромок профилей НЛ у ступени 2 выведены на направление радиуса у корня и на периферии (рисунок 7).

Таким образом, под влиянием ТННЛ, кроме искривления меридианных линий тока, возникает также «косое» обтекание НЛ, которое существенно отличается от традиционной модели течения в лопаточных венцах турбинной ступени на осесимметричных поверхностях тока.

На рисунке 8 видно, что обе турбинные ступени достигают максимума КПД при значении параметра $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0{,}58$. Во всей зоне изменения значения $\frac{u}{C_0}$ КПД турбинной ступени 1 с тангенциальным наклоном направляющих лопаток ниже, чем в турбинной ступени 2 с «интегральными» НЛ. На оптимуме КПД ступени 2 больше ступени 1 на 0,6%.

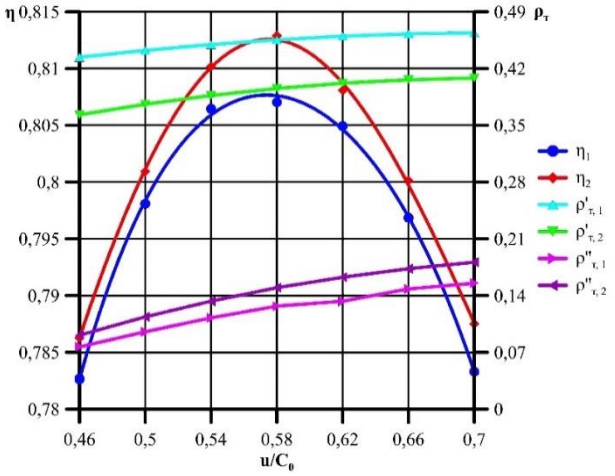

Рисунок 8. Суммарные характеристики турбинных ступеней.

За счет применения ТННЛ в обеих ступенях степень реактивности у корня больше, чем у периферии, т.е. градиент степени реактивности вдоль радиуса – отрицателен. Вместе с тем, разность степеней реактивности $\Delta\rho_T = \rho_T^{''} - \rho_T^{'}$ на оптимальном режиме для ступени 1 равна (-0,33), а для ступени 2 –(-0,25), что объясняется различием в конструкции направляющих аппаратов этих ступеней.

Решетки НЛ ступени 1 спроектированы профилями, лежащими на цилиндрических поверхностях тока, при условии $\alpha_{1эф}$=const. Для исследования влияния иных способов рационального проектирования НЛ в турбинных ступенях с ТННЛ рассмотрены еще две турбинные ступени: турбинная ступень 3 – перо НЛ спроектировано без ТННЛ и затем в целом поворачивается на заданный угол тангенциального наклона $\delta = 23^0$ на среднем радиусе, турбинная

ступень 4 – решетка НЛ спроектирована методом нарастающего вдоль радиуса эффективного угла $\alpha_{1эф}$ [4]. РК у ступеней 3 и 4 такое же, как в ступени 1.

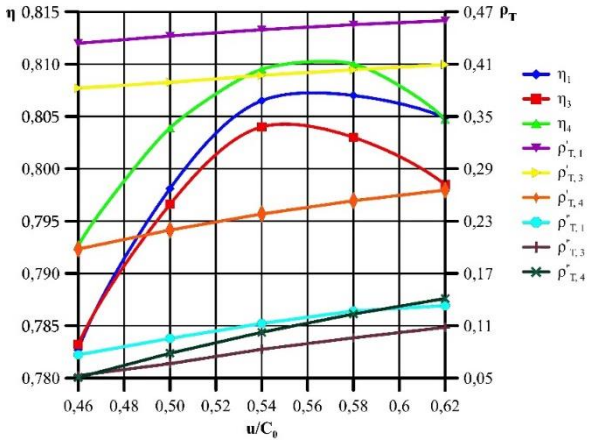

Рисунок 9. Суммарные характеристики турбинных ступеней.

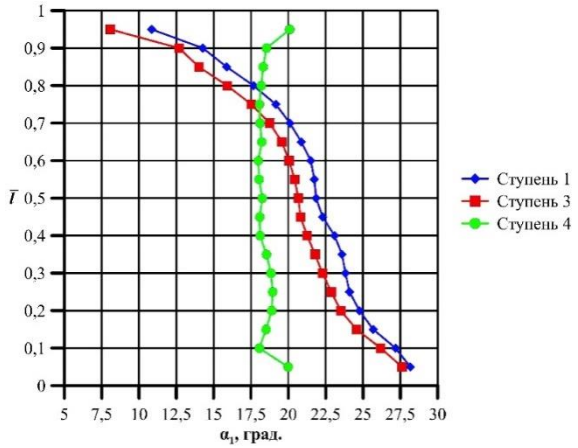

Рисунок 10. Изменение угла потока α_1 по высоте лопатки.

На рисунке 9 видно, что КПД ступени 4 больше, чем КПД ступеней 1 и 3 на всех режимах и разница по максимальным значениям составляет 0,3% по сравнению со ступенью 1 и 0,6% по сравнению со ступенью 3. Ступень 3 проигрывает по экономичности вблизи оптимума ступени 1. Оптимум по КПД в ступени 3 смещен по сравнению со ступенями 1 и 4 в сторону больших значений параметра $\frac{u}{C_0}$.

Степень реактивности $\rho_T^{''}$ у периферии всех трех ступеней различаются не на много. Степень реактивности у корня $\rho_T^{'}$ ступени 4 меньше, чем у ступеней 1 и 3. Величина $\Delta\rho_T = \rho_T^{''} - \rho_T^{'}$, характеризующая снижение градиента степени реактивности, отрицательна для всех трех ступеней и максимальна (по модулю) для ступени 1 и минимальна (по модулю) для ступени 4 (соответственно, -0,33, -0,31 и -0,13 при $\frac{u}{C_0} = 0.58$).

На рисунке 10 показаны результаты траверсирования углов потока α_1 по высоте лопатки. Как уже отмечалось, хотя эффективные $\alpha_{1эф}$ углы решёток в ступени 1 на цилиндрических поверхностях тока постоянны по высоте НЛ, поточные углы α_1 уменьшаются от корня к периферии. При этом характер изменения угла α_1 вдоль радиуса в ступени 3 такой же, как и в ступени 1. Напротив, угол потока α_1 в ступени 4 почти постоянен вдоль радиуса, в то время как эффективные $\alpha_{1эф}$ углы решёток нарастают по высоте НЛ. Это объясняется тем, что профили решеток НЛ в ступени 4 на пяти сечениях повернуты так, чтобы устранить разницу между углами $\alpha_{1эф}$ и α_1, полученную в ступени 1. Численный эксперимент доказал целесообразность такого подхода при проектировании

турбинных ступеней с традиционным ТННЛ при условии $\alpha_1 = const$, так как внутренний КПД ступени 4 максимален.

На рисунке 10 видно, что проектирование НЛ методом нарастающего вдоль радиуса эффективного угла $\alpha_{1эф}$ обеспечивает выполнение условия постоянства угла потока $\alpha_1 = const$ перед РЛ в ступени со значительным ТННЛ.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния ТНРЛ на характеристики, структуру потока и градиент степени реактивности осевых турбинных ступеней и влияния тангенциального наклона на напряжения в РЛ в осевых турбинных ступенях. Исследуемые турбинные ступени имеют одинаковые радиальные НЛ (линии центров масс ориентированы по радиусу) и различные незакрученные РЛ, тангенциальные углы наклона которых (угол между осью *r* и линией центров масс РЛ в плоскости *r*-*u* на среднем радиусе) равны соответственно 0° (I), $+10^\circ$ (II), -3° (III), -10° (IV) и «интегральные» РЛ (V) с углом наклона -10° на среднем радиусе [1-3].

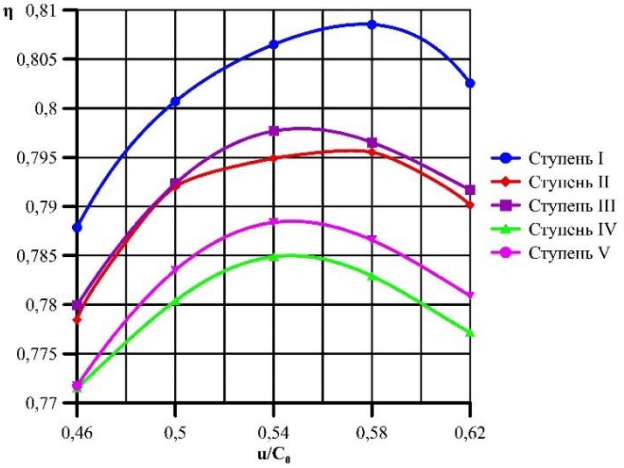

Рисунок 11. Зависимость КПД ступеней от параметра $\frac{u}{C_0}$.

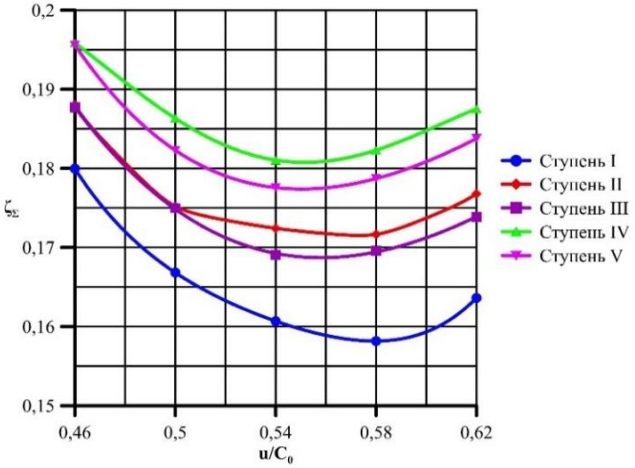

Рисунок 12. Зависимости коэффициентов ζ_Σ от параметра $\frac{u}{C_0}$.

На рисунке 11 показаны зависимости внутренних КПД осевых турбинных ступеней от параметра $\frac{u}{C_0}$. Видно, что при наличии угла наклона РЛ (как отрицательного, так и положительного) внутренний КПД турбинных ступеней уменьшается по сравнению со ступенью I. При одном значении (по модулю) угла наклона 10 градусов турбинная ступень с положительным наклоном РЛ имеет КПД больше, чем турбинная ступень с отрицательным наклоном. Чем больше отрицательный угол наклона РЛ в направлении вращения ротора, тем меньше КПД турбинной ступени. Ступень I имеет наибольший КПД при значении $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0{,}58$, а ступень IV – наименьший КПД при значении $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0{,}54$

(рисунок 11). КПД ступени V, с «интегральными» РЛ, выполненных по типу «интегральных» НЛ, на 0,4% больше КПД варианта IV на оптимальном режиме. На рисунке 12 показано, что коэффициент суммарных потерь кинетической энергии ступени V меньше, чем в варианте IV (рисунок 12), так как у корня и на периферии РЛ варианта V приближаются по свойствам к РЛ ступени I.

На рисунках 13 – 14 представлены зависимости степеней реактивности у корня $\rho_T^{'}$ и у периферии $\rho_T^{''}$ от параметра $\frac{u}{C_0}$. При положительном угле наклона РЛ (ступень II) степень реактивности у корня ступени нарастает, а у периферии уменьшается, т.е. уменьшается градиент степени реактивности по сравнению со ступенью I. Напротив, при отрицательном угле наклона РЛ (ступени III, IV и V) степень реактивности у корня уменьшается и нарастает у периферии, то есть градиент степени реактивности увеличивается.

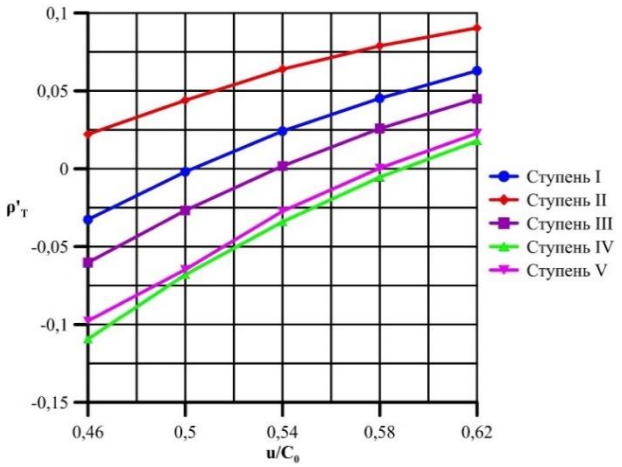

Рисунок 13. Зависимости степени реактивности $\rho_T^{'}$ у корня от параметра $\frac{u}{C_0}$.

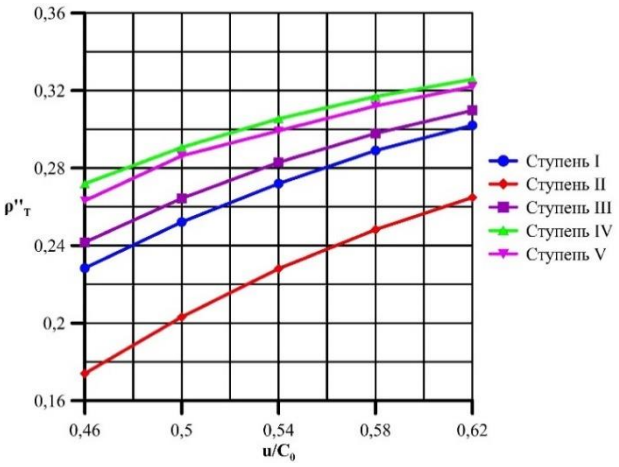

Рисунок 14. Зависимости степени реактивности $\rho_T^{''}$ у периферии от параметра $\frac{u}{C_0}$.

Таким образом, ТНРЛ, как и ТННЛ, также является одним из способов воздействия на градиент степени реактивности в осевой турбинной ступени.

Для исследования влияния тангенциального наклона на напряжения в РЛ в осевых турбинных ступенях решены две задачи: первая - определение эквивалентных напряжений (напряжений на растяжение) в корневом сечении РЛ без учета аэродинамических сил с помощью программы Static Structural, вторая - определение эквивалентных напряжений в корневом сечении РЛ с учетом аэродинамических сил, с привлечением программы Fluent. По полученным результатам вычисляются средние (по площади корневого профиля лопатки) значения напряжений во всех вариантах.

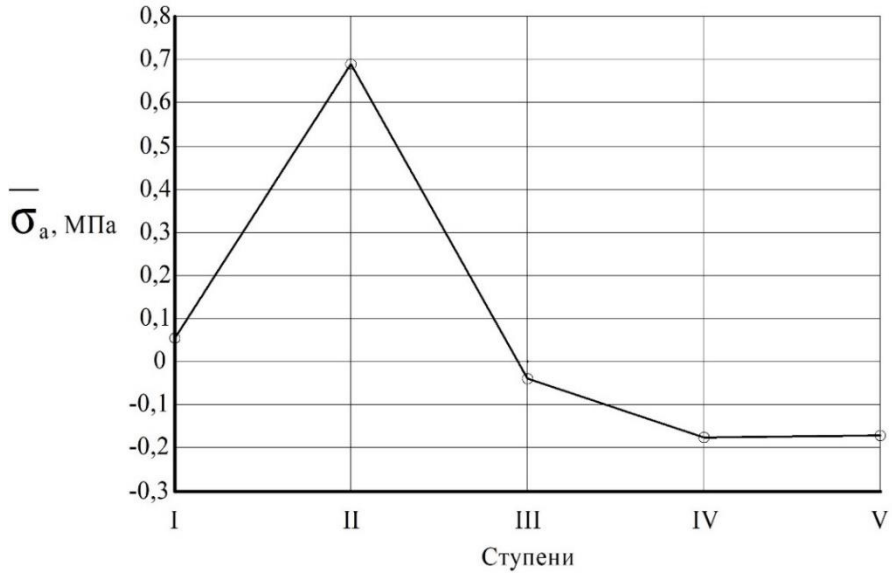

Рисунок 15. График изменения среднего значения напряжений $\overline{\sigma_a}$ от аэродинамических сил для всех вариантов.

Среднее значение напряжений $\overline{\sigma_a}$, возникающих под влиянием аэродинамических сил, равно разнице между средним значением эквивалентных напряжений с учетом аэродинамических нагрузок и средним значением эквивалентных напряжений без учета аэродинамических нагрузок. Эти напряжения в наших расчетах невелики в силу небольших скоростей и малой плотности газа.

На рисунке 15 видно, что под действием аэродинамических нагрузок при нулевом и положительном наклонах возникают положительные, а при отрицательном и «интегральном» наклонах – отрицательные средние значения $\overline{\sigma_a}$ напряжений от аэродинамических сил. При этом использование отрицательного и «интегрального» наклонов РЛ практически равноценно (табл. 4.3. 2) и позволяет эффективно компенсировать напряжения, возникающие под действием аэродинамических нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнение результатов 3D расчетов с экспериментальными данными для сложного объекта исследования: оригинальной турбинной ступени 1 с отрицательным градиентом степени реактивности за счет применения значительного (δ_c=23^0) ТННЛ - позволяет сделать вывод о том, что совпадение результатов расчетов и опытов вполне удовлетворительное и поэтому программу ANSYS CFX можно уверенно использовать в качестве виртуального стенда и применять ее для изучения характеристик и структуры потока газа дозвуковых турбинных ступеней как обычного типа, так и с ТННЛ.

2. Исследованные ступени с отрицательным градиентом степени реактивности и РЛ постоянного профиля имеет достаточно высокую экономичность, особенно при больших радиальных зазорах у периферии РЛ без бандажа, и поэтому могут быть рекомендованы для применения в проточных частях турбин высокотемпературных ГТУ. Высокая корневая степень реактивности этих ступеней открывает дополнительные возможности по минимизации осевого усилия, действующего на общий ротор «компрессор – турбина» ГТУ.

3. В турбинных ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным под влиянием ТННЛ, меридианные линии тока в осевом зазоре между направляющими и рабочими лопатками искривлены выпуклостью к оси турбины z. Линии тока внутри каналов между НЛ формируют поверхности тока, почти перпендикулярные перу НЛ, то есть для ступеней такого типа характерно «косое» обтекание НЛ.

4. По сравнению с исходной турбинной ступенью с отрицательным градиентом степени реактивности, по соображениям экономичности выгоднее применять турбинную ступень с «интегральными» НЛ, которая имеет максимальный внутренний КПД среди всех 9-ти испытанных на виртуальном стенде ступеней и поэтому является оптимальной в рамках выполненных исследований.

5. Исследования трёх турбинных ступеней с традиционным ТННЛ, выполненные на виртуальном стенде, показали целесообразность проектирования НЛ с тангенциальным наклоном профилями, находящимися на цилиндрических поверхностях тока. Проектирование НЛ с тангенциальным наклоном за счет поворота пера всей НЛ менее благоприятно.

6. Стремление в ступени с традиционным ТННЛ добиться выполнения условия постоянства угла потока $\alpha_1 = const$ перед РЛ требует проектирования НЛ с нарастающим вдоль радиуса эффективным углом $\alpha_{1эф}$ решёток профилей.

7. Влияние даже небольшого ТНРЛ на характеристики, структуру потока, градиент степени реактивности и потери кинетической энергии осевой турбинной ступени довольно существенно, как при положительных углах наклона РЛ, так и, особенно, при отрицательных углах наклона РЛ.

8. Доказано, что ТНРЛ, как и ТННЛ, также является одним из способов воздействия на градиент степени реактивности в осевой турбинной ступени.

9. С целью компенсации напряжений, действующих на РЛ со стороны газа, по соображениям экономичности рационально применять «интегральные» РЛ.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Влияние тангенциального наклона на напряжения в рабочих лопатках осевой турбинной ступени. Неделя науки

СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19 – 24 ноября 2018 года. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. I. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 167 – 170.

2. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии в осевой турбинной ступени. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. с. 66-73. DOI:10.18721/JEST.230406 (**Перечень ВАК**).
3. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на характеристики осевой турбинной ступени. Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием.14-19 ноября 2016 года. Лучшие доклады. с.12-15.
4. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. К вопросу о рациональном проектировании турбинных ступеней с тангенциальным наклоном направляющих лопаток. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 4. № 3. с. 114-125. DOI:10.18721/JEST.240310 (**Перечень ВАК**).
5. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Применение аэродинамического пакета ANSYS CFSX для определения характеристик турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 1 – 6 декабря 2014 года. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. I. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 93 – 95.
6. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Структура течения газа в осевой турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 118 – 131. DOI: 10.18721/JEST.25209 (**Перечень ВАК**).
7. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб. Изд-во Политехнического университета. 2016. №2. с. 163–173 (**Перечень ВАК**).