



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

ТЮХТЯЕВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**Разработка и исследование направляющих аппаратов последних
ступеней паровых турбин большой мощности**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2024

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

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рассохин Виктор Александрович
- Официальные оппоненты: **Исаев Сергей Александрович** - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», г. Санкт-Петербург
- Жинов Андрей Александрович** - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые двигатели и гидромашины» Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «29» октября 2024 г. в 18.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.2.4.7.36, д.т.н., доц.

Барсков Виктор Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Электроэнергия в современном мире является неотъемлемой частью всех сфер. Доступность и стоимость электрической энергии влияет на безопасность страны и является драйвером развития легкой и тяжелой промышленности, транспортной инфраструктуры, и существенно влияет на уровень жизни населения страны. Более 60% электроэнергии вырабатывается на тепловых и атомных электростанциях. Среди них основной вклад в генерацию электроэнергии вносят паровые турбины средней и большой мощности.

Надежность и экономичность мощных паровых турбин, в том числе, зависит от ресурса и эффективности работы лопаточного аппарата проточной части низкого давления. Из-за влияния влажности, существенных градиентов параметров потока пара по высоте ступени, вторичных течений в корневой и периферийной зонах, локального разгона и торможения потока пара, возникновения отрывных зон и областей сверхзвукового течения пара КПД последних ступеней паровых турбин может снижаться на 10-15%.

За счет формы аэродинамических профилей направляющих лопаток можно изменить распределение параметров пара в ступени и повысить эффективность работы активных и пассивных систем сепарации влаги и защиты рабочих лопаток от эрозии.

Применение комбинации осевого и тангенциального навалов аэродинамического профиля направляющего аппарата позволяет: изменить распределение давления в ступени (как в осевом, так и в радиальном направлении); повысить степень реактивности в корневом сечении, расширить диапазон устойчивой работы ступени без образования обратных течений в корневой области; снизить скорость течения пара за направляющим аппаратом (НА) в корневой области; перераспределить больше пара к среднему диаметру ступени, снизив потери от скачков уплотнений в периферийной области рабочего колеса и уменьшить протечку пара над бандажами рабочих лопаток. Множество варьируемых параметров, влияющих на форму аэродинамического профиля НА последней ступени, приводит к необходимости автоматизации процесса проектирования. Активное развитие систем автоматизированного проектирования (САПР), программ для выполнения газодинамических расчетов (ЛОГОС, Ansys Fluent, CFX, Numeca) и непрерывное наращивание конструкторскими бюро вычислительных мощностей позволяет разрабатывать параметрические модели и выполнять сотни трехмерных расчетов течения пара в ступени за короткий промежуток времени. Для эффективного использования указанных выше инструментов требуется достоверная, верифицированная путем сравнения с экспериментальными данными, инженерная методика.

В связи с этим задача создания удобной и понятной инженеру (инженерной) методики проектирования направляющих аппаратов последних ступеней мощных паровых турбин, учитывающей применение навалов, организации активных и пассивных систем защиты от эрозии рабочих лопаток, накопленных экспериментальных знаний, современных расчетных пакетов и обеспечивающей высокий уровень автоматизации является актуальной и востребованной.

Совмещение инженерных задач расчета и конструирования на основе совершенствования математических моделей физических явлений и конструктивных форм проточных частей является особенно актуальным при создании общей системы машинного проектирования. Применение более современных методов расчета и проектирования проточных частей паровых турбин требуют проведения анализа целого комплекса исследований по изучению рабочего процесса в турбинной ступени и группе ступеней, чтобы иметь соответствие расчетных характеристик проектируемого оборудования эксплуатационным.

В связи с этим, создание высокоэкономичных проточных частей паровых турбин для технического перевооружения электростанций является важной и актуальной научно-технической задачей теплоэнергетики.

Целью работы является изучение конструкций диафрагм низкого давления и влияния различных форм навала аэродинамических профилей направляющих лопаток на распределение параметров пара в ступени, разработка методологических рекомендаций по проектированию НА низкого давления и создание нового НА мощной паровой турбины.

Объектами исследования являются отсеки последних ступеней низкого давления мощных паровых турбин и установленные в них направляющие аппараты.

Предмет исследования: конструкция направляющего аппарата

Задачи исследования:

1. На основе обзора литературных источников и известных конструктивных элементов, влияющих на эффективность и надежность работы отсеков паровых турбин разработать способы повышения эффективности проточных частей низкого давления, основанные на применении на практике современных методов расчетной оптимизации последних ступеней с рабочими лопатками предельной длины.

2. Выполнить верификацию программ газодинамического расчета путем сравнения полученных результатов расчета параметров течения пара в отсеке низкого давления с экспериментальными данными, полученными на натурном стенде.

3. На основе численного моделирования провести расчетные исследования влияния различного радиального и осевого навала направляющих лопаток на распределение параметров пара в ступени, и сформулировать соответствующие методические рекомендации.

4. Выполнить разработку нового НА последней ступени мощной паровой турбины.

5. Провести экспериментальные исследования нового НА в составе отсека ступеней низкого давления на крупномасштабном экспериментальном стенде.

6. Выполнить анализ полученных результатов экспериментальных исследований на крупномасштабном стенде и сравнить полученные данные с расчетными значениями.

Научная новизна работы состоит в том, что обобщенный в диссертации комплекс научных основ теоретических и экспериментальных исследований в сочетании с разработанными методами и программами для ЭВМ позволяют эффективно решать крупную народнохозяйственную задачу: совершенствование существующих и создание новых отсеков последних ступеней

пелей паровых турбин, обладающих высокими показателями экономичности и надежности при техническом перевооружении электростанций.

Научная новизна получена за счет того, что в диссертации:

1. На основе патентного исследования впервые в практике отечественного турбостроения проведен анализ степени заинтересованности проектных и конструкторских организаций как у нас в стране, так и за рубежом в дальнейшем совершенствовании отсеков последних ступеней и НА, определена динамика патентования и выявлены страны – лидеры.

2. Предложен новый верифицированный метод трехмерных газодинамических расчетов и проектирования отсека ступеней низкого давления, основанный на использовании результатов испытаний на натурном стенде в масштабе 1:1.

3. Впервые выполнена классификация форм навала аэродинамических профилей направляющих лопаток в тангенциальной плоскости и даны рекомендации по построению параметрических моделей таких профилей. Представлены оригинальные зависимости, описывающие произвольное положение образующей выходной кромки профиля в пространстве в зависимости от формы навала и определены интервалы изменения параметров данных зависимостей.

4. Разработан и представлен подробный алгоритм проектирования направляющего аппарата последних ступеней паровых турбин с использованием оптимизационных процедур и даны методические рекомендации по каждому этапу проектирования.

5. Разработан и защищен патентами целый ряд конструктивных решений по исполнению НА последних ступеней паровых турбин, включая и новый НА с активной и пассивной системами сепарации влаги и дробления капель, а также с комбинированным осевым и тангенциальным навалом аэродинамического профиля.

6. Разработан, испытан на крупномасштабном стенде и внедрен в реальную конструкцию последней ступени мощной паровой турбины НА с комбинированным осевым и тангенциальным навалом аэродинамического профиля.

Практическая значимость работы.

1. Патентное исследование подтвердило высокий интерес у ведущих турбостроительных фирм к совершенствованию конструкции НА низкого давления. При этом, наибольшими темпами развивается азиатский регион. Наибольшее количество заявок на патенты поступает из КНР и Японии.

2. Классификация различных вариантов навала позволила структурировать ранее полученные знания, а предложенные автором работы формулы позволяют создать гибкую параметрическую модель аэродинамического профиля НА с ограниченным количеством варьируемых переменных.

3. Хорошее совпадение результатов газодинамического расчета отсека ступеней низкого давления с экспериментальными данными подтверждает корректность использования модели равновесного влажного пара, модели турбулентности $k - \omega$ SST для численного моделирования течения путем решения системы уравнений Навье-Стокса (при условии применения двух-

параметрических моделей турбулентности — системы уравнений Рейнольдса) методом контрольных объемов в стационарной периодической постановке.

4. Подробный алгоритм проектирования НА, учитывающий циклы подбора углов навала, оптимальных для проектируемой ступени, позволяет структурировать и качественно спланировать конструкторскую работу.

5. Разработанный и испытанный на крупномасштабном стенде НА применен в составе последней ступени мощной отечественной паровой турбины. Анализ результатов испытаний показал высокую эффективность и хорошее совпадение заложенных при проектировании характеристик с экспериментальными данными.

Метод исследования. Работа выполнена с использованием численно-экспериментального метода (трехмерные газодинамические расчеты) и метода проведения натурального эксперимента на крупномасштабном стенде.

Личный вклад автора заключается:

1. Анализ публикаций и патентной информации по конструкции НА последних ступней низкого давления.

2. Классификация различных форм тангенциального навала и описание алгоритма проектирования НА низкого давления.

3. Разработка трехмерных моделей 4-х ступенчатого отсека низкого давления, проведение серии газодинамических расчетов течения пара в данном отсеке и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при испытании такого отсека на натурном стенде в масштабе 1:1.

4. Разработка параметрической модели профиля НА и проведение численного эксперимента влияния формы навала на распределение параметров пара в ступени с помощью пакета вычислительных программ Numesa и программы оптимизации IOSO.

5. Разработка аэродинамического профиля с применением комбинации осевого и тангенциального навала для НА последней ступени мощной паровой турбины.

6. Участие в подготовке к испытаниям, испытаниях и обработке результатов испытаний проточной части низкого давления мощной паровой турбины на крупномасштабном паровом стенде.

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

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена:

- применением для численного эксперимента апробированных моделей турбулентности и алгоритмов расчетов течения рабочего тела методом конечных объемов, реализованных в современных коммерческих пакетах, для которых результаты газодинамических расчетов прошли верификацию с экспериментальными данными;

- использованием поверенного измерительного оборудования и оттарированных датчиков и насадков газодинамических зондов при проведении натуральных экспериментальных исследований на опытной паровой турбине;

- проведением экспериментальных исследований в крупном масштабе от 1:2 до 1:1 с моделированием всех особенностей конструкции (галтели, фаски, радиусы, шероховатость и т.д.), влияющих на течение пара в ступени турбины;
- проведение экспериментальных исследований на паровом стенде, параметры пара на котором на входе в модельную проточную часть (проточную часть опытной турбины) и выходе из нее соответствуют параметрам отсека ЦНД мощной паровой турбины.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика проектирования НА с применением параметрических моделей, комбинации осевого и тангенциального навалов профиля и автоматизации циклов выбора размеров и параметров моделей.
2. Классификация форм тангенциального навала и анализ их влияния на распределение параметров пара в ступени.
3. Результаты верификации численного экспериментального исследования течения пара в проточной части низкого давления путем сравнения с данными измерений, полученными на натурном стенде.
4. Конструкция нового НА последней ступени низкого давления мощной паровой турбины, подготовка к испытаниям данного НА в составе отсека НД и результаты испытания его на крупномасштабном паровом стенде.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях, семинарах, выставках, включая следующие: Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (Россия, г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2012 г.), XXXII всероссийская конференция по проблемам науки и технологий (Россия, г. Миасс, МСНТ, 2013 г.); Неделя науки СПбГПУ, научно-практическая конференция с международным участием, институт энергетики и транспортных систем (Россия, г. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2014 г.); международной выставке и конференции Russia Power (Россия, г. Москва, 2014 г.); международной конференции Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Корея, г. Сеул, ASME, 2016 г.), конференции молодых инженеров (Россия, г. Санкт-Петербург, АО «Силловые Машины», ЛМЗ, 2011 и 2013 годы), международной конференции начальников турбинных цехов (Россия, г. Москва, ГК РОСЭНЕРГОАТОМ, 2020 г.).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 15 работах, среди которых – 4 публикации в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по искомой специальности, 3 – публикаций в журналах, рекомендованных ВАК по смежным специальностям, 2 - публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 2 – публикации в сборниках конференций, получено 4 патента РФ на изобретения.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 155 страниц, включая 136 страниц основного текста, 92 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана роль НА последних ступней низкого давления в повышении надежности и эффективности работы паровых турбин большой мощности и обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе Проведен анализ публикаций и патентной документации по конструкции НА. Выявлены ключевые направления, развитие которых необходимо для дальнейшего совершенствования НА, такие как: внедрение развитых систем сепарации влаги, применение различных форм тангенциального и осевого навала аэродинамического профиля, внедрение автоматизированных систем проектирования и развитие стендовой базы для проведения натурных испытаний НА в составе отсеков ступней низкого давления.

Во второй главе приведена методика проектирования НА, состоящая из следующих основных этапов: эскизной разработки проточной части отсека, разработки аэродинамических профилей НА, разработки твердотельной модели НА с системами сепарации влаги, расчетное исследование отсека с разработанным НА и выпуск РКД, экспериментальное исследование отсека на крупномасштабном стенде.

На этапе эскизной разработки проточной части определяется тип облопачивания – активное или реактивное, определяется оптимальное количество ступеней в цилиндре, выбираются корневые и периферийные диаметры проточной части, формируется плавный обвод проточной части. После этого, на основе баланса турбоустановки, выполняется серия проектировочных расчетов проточной части в одномерной, а затем и двумерной постановке. При проведении указанных выше расчетов задаются характеристики аэродинамических профилей направляющих и рабочих лопаток путем указания ширины и высоты аэродинамических профилей на корневом и периферийном сечениях, указываются углы входа и выхода потока, выбирается закон закрутки переменных по высоте аэродинамических профилей.

Разработка аэродинамических профилей НА проводится в два этапа, каждый из которых может быть автоматизирован. Сначала, на основе заложенных в проектировочный расчет характеристик профиля, разрабатываются плоские сечения профиля. Каждое сечение строится из четырех частей: двух дуг окружностей, образующих входную и выходную кромки, и двух полиномиальных кривых, образующих сторону давления и сторону разрежения. Возможен выбор полинома 5-го, 7-го, 9-го, или 11-го порядка. В конечных точках кривых, описывающих стороны давления и разрежения, фиксируются координаты x и y , фиксируется первая производная для обеспечения касания дуг окружностей, описывающих кромки (а также для обеспечения касания прямой в случае наличия прямого участка).

Оставшиеся несвязанными коэффициенты полинома определяются в результате решения оптимизационной задачи, где минимизируется максимальная кривизна (каждому конкретному набору коэффициентов соответствует конкретная полиномиальная кривая, конкретное распре-

$$T_{5x} = \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \left[(1 - C_2 \cdot P_2) - P_1 \cdot C_1 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right) \right]; \quad T_{5y} = 1 - C_2 \cdot P_2;$$

$$T_{6x} = \operatorname{tg} \alpha_3 \cdot C_2 \cdot P_2 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \left[(1 - C_2 \cdot P_2) - P_1 \cdot C_1 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right) \right];$$

$$\Sigma X/l = C_1 \cdot \int_0^1 M_{1x}(t) dt + (1 - C_1 - C_2) \cdot \int_0^1 M_{2x}(t) dt + C_3 \cdot \int_0^1 M_{3x}(t) dt$$

Где α_1 – угол навала в корне, α_2 – угол навала в средней части, α_3 – угол навала на периферии, C_1 и C_2 – определяют кривизну образующей в корневой и периферийной области, P_1 и P_2 определяют размер корневой и периферийно области (Рисунок 1).

Таким образом, изменяя 7 различных параметров ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, C_1, C_2, P_1, P_2$), можно при-

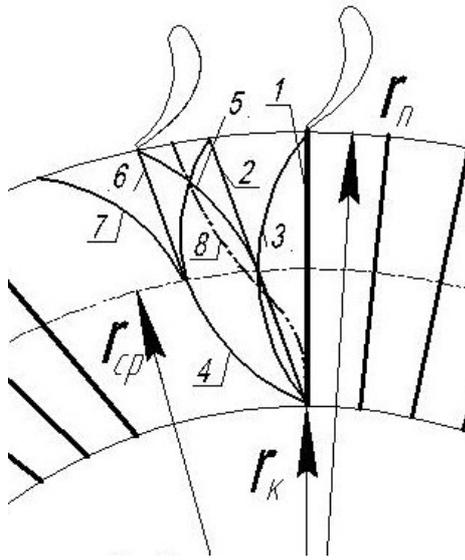


Рисунок 2 – Формы образующей выходной кромки при различных тангенциальных навалах

давать НА различные формы навала (рисунок 2). В зависимости от значений варьируемых параметров могут быть получены различные формы навала. Для удобства использования приведенной системы уравнений выполнена классификация форм тангенциального навала и в таблице 1 приведены интервалы изменения коэффициентов, позволяющие получить необходимую форму навала.

На основе полученной модели аэродинамического профиля, а также эскиза проточной части выполняется разработка твердотельной модели НА и проводятся соответствующие прочностные расчеты.

Далее выполняется исследование проточной части разработанного отсека путем проведения численного эксперимента. Для этого могут быть применены коммерческие программные продукты, такие как NUMECA Данный пакет программ предназначен для численного моделирования течения путем решения системы уравнений Навье-Стокса (при условии применения двухпараметрических моделей турбулентности — системы уравнений Рейнольдса) методом контрольных объемов. Для подтверждения достоверности получаемых результатов проведено сравнение результатов расчета отсека ступеней низкого давления с экспериментальными данными, полученными на натурном стенде ЭТПН-2 в масштабе 1:1.

Таблица 1 – Формы тангенциального навала

1	Без навала, радиальная кромка	$\alpha_{me} = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0; C_1 = C_2 < 0.5; P_1 = P_2 = 0.5$
2	Прямой тангенциальный	$\alpha_{me} = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3; C_1 = C_2 < 0.5; P_1 = P_2 = 0.5$
3	Саблевидный	$\alpha_1 = -\alpha_3; \alpha_2 \rightarrow 0; C_1 = C_2 \rightarrow 0.5; P_1 = P_2 < 1$
4	Наклонный саблевидный	$\alpha_1 = -3\alpha_3; \alpha_2 = \frac{1}{3}\alpha_1; C_1 = C_2 \rightarrow 0.5; P_1 = P_2 < 1$

5	форма перевернутой ложки	$\alpha_1 = \alpha_2 = -\alpha_3; C_1 < 1; C_2 \rightarrow 0; P_1 = 0.5; P_2 < 1$
6	J форма (форма ложки)	$\alpha_1 = \alpha_2; \alpha_3 < \alpha_1; C_1 < 1; C_2 \rightarrow 0; P_1 = 0.5; P_2 < 1$
7	S форма	$\alpha_1 = \alpha_3; \alpha_2 \rightarrow 0; C_1 = C_2 \rightarrow 0.5; P_1 = P_2 < 1$
8	“Интегральный”	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0; \alpha_2 > 0; C_1 = C_2 \rightarrow 0.5; P_1 = P_2 < 1$

При этом, газодинамические расчеты отсека ступеней проводились в указанной стационарной постановке. Для дискретизации по пространству использовались схемы второго порядка точности.

Для ступеней цилиндров низкого давления паровых турбин характерны числа Рейнольдса $10^5 - 10^7$. Таким образом, течение является турбулентным. В описываемых расчетах использовалась модель турбулентности $k - \omega$ SST. Она является наиболее часто применяемой при решении задач моделирования течения в лопаточных аппаратах осевых турбин. Расчетная сетка с

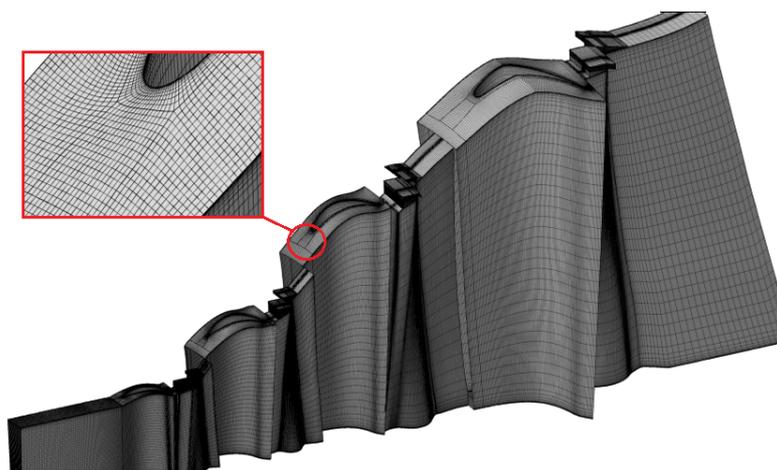


Рисунок 3 – Расчетная сетка

блочной структурой была создана в сеточном генераторе Autogrid5, и состоит из 8 миллиона ячеек (рисунок 3).

Свойства водяного пара задавались таблично с последующей интерполяцией. Для моделирования влажности использовалась равновесная модель. Полидисперсность водяной фазы не моделировалась.

Сравнение расчетного и экспериментального распределения статического давления за предпоследней и последней ступенью отсека (рисунок 4) показывает очень хорошее совпадение, а отклонения на относительной высоте $l=0.6$ связаны с наличием в экспериментальной проточной части бандажной проволоки. При проведении газодинамических расчетов проволока не моделировалась.

Хорошее совпадение результатов газодинамического расчета с экспериментальными данными обосновывает использование численного эксперимента в приведенной выше постановке для изучения влияния форм навала на распределение параметров пара в ступени.

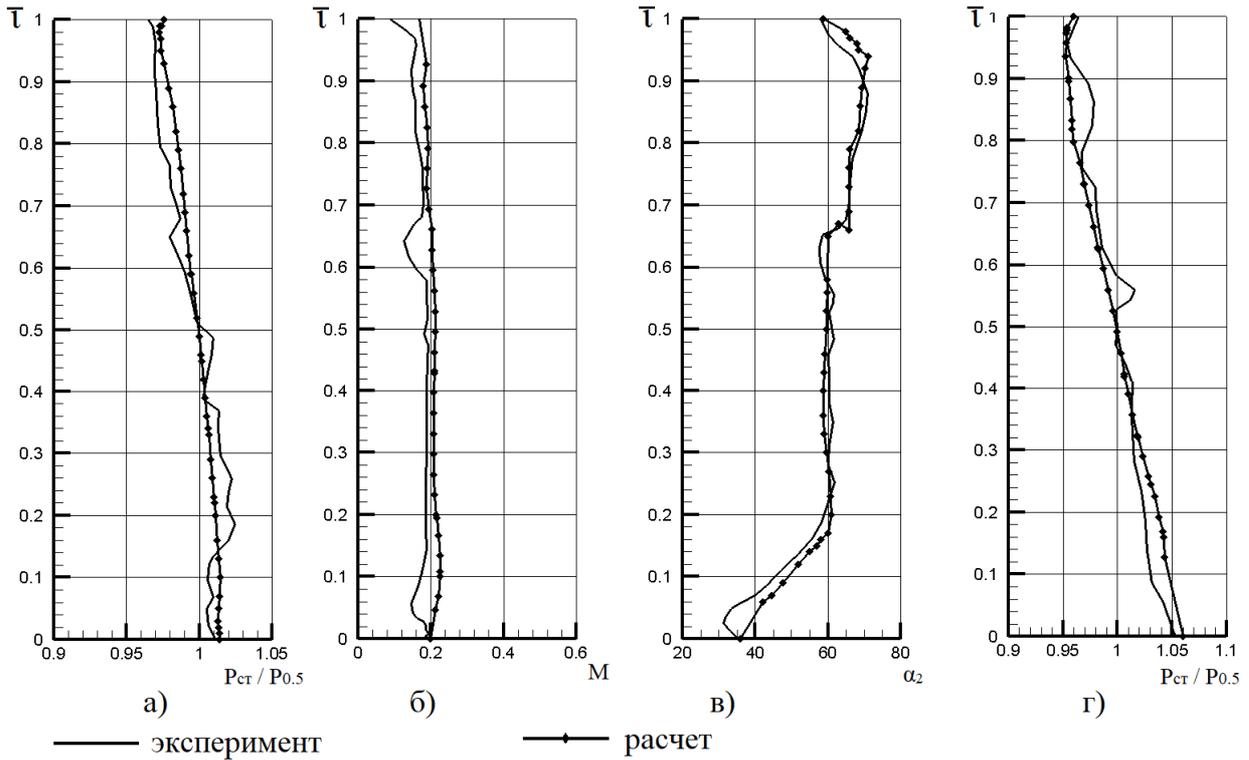


Рисунок 4 – Распределение параметров пара перед и за последней ступенью

(а - распределение приведенного статического давления перед последней ступенью, б - распределение абсолютного числа Маха перед последней ступенью, в - распределение угла выхода потока перед последней ступенью, г - распределение приведенного статического давления за последней ступенью)

С этой целью автором была создана параметрическая модель профиля НА последней ступени указанного выше отсека ступеней. Процедура изменения модели профиля, перестроения расчетной сетки, газодинамического расчета и обработки результатов была полностью автоматизирована. Связать между собой различные программные модули позволила программа IOSO. Также в этой программе был задан план эксперимента, в рамках которого была определена сетка варьируемых переменных $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, C_1, C_2, P_1, P_2$ и угол установки профиля в корневом сечении.

На основании расчетных исследований, проведенных автором, было установлено, что при увеличении углов навала происходит изменение формы и положения в пространстве поверхностей давления («корыта») и разрежения («спинки») аэродинамического профиля. Поверхность давления растягивается, а поверхность разрежения сжимается. Скорость течения пара на поверхности давления возрастает, а на поверхности разрежения падает. Эпюры давления в межлопаточном канале НА перераспределяются. Помимо этого было установлено, что из-за увеличения наклона стенок межлопаточного канала, возрастает сила воздействия профиля на поток пара, компенсирующая смещение линий тока пара в радиальном направлении.

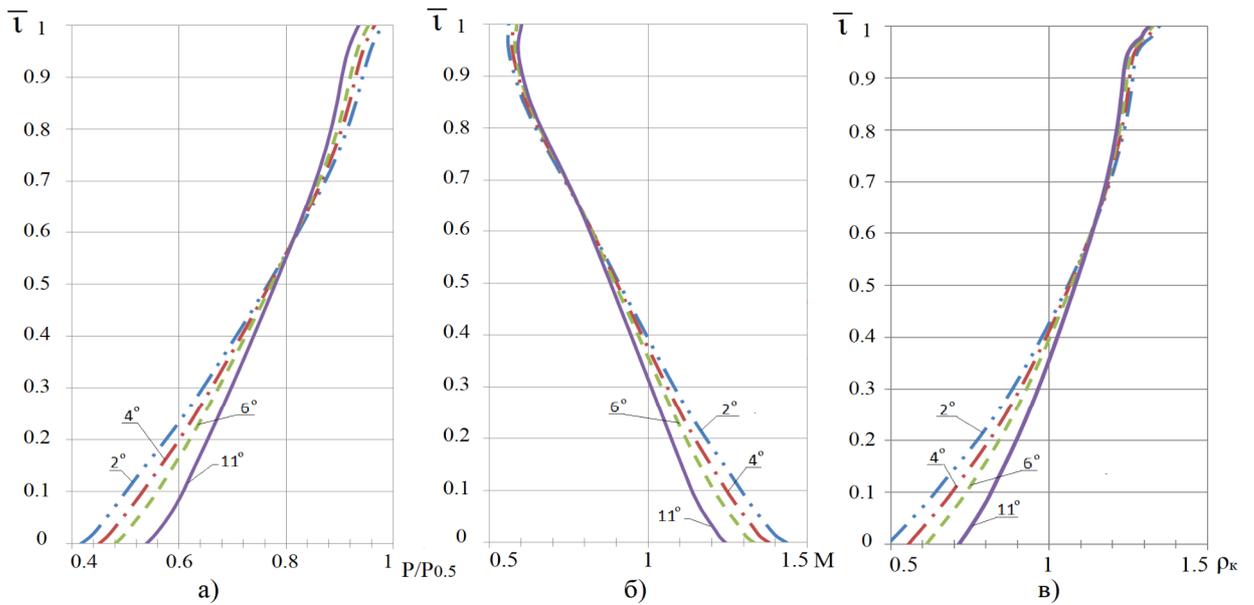


Рисунок 5 – Изменение параметров потока пара по высоте ступени при различных углах прямого тангенциального навала: а – статическое давление в сечении за НА, б – число Маха в сечении за НА, в – кинематическая реактивность (угол прямого навала — 2° , — 4° , — 6° , — 11°)

При увеличении угла навала (рисунок 5) в корневом сечении: увеличивается статическое давление, снижается скорость потока пара за НА и возрастает кинематическая реактивность ступени.

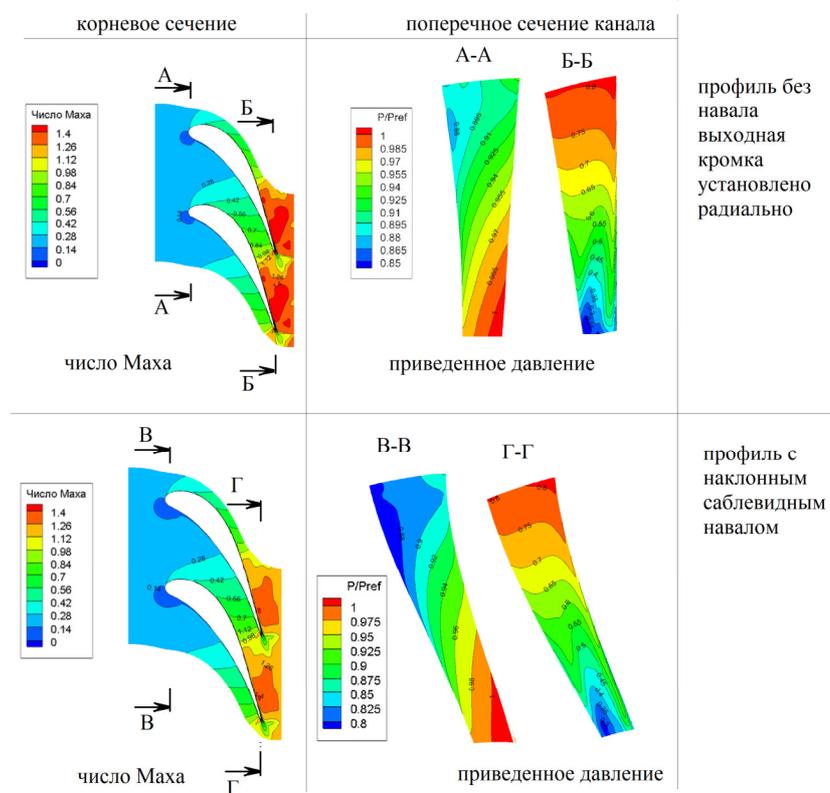


Рисунок 6 – Распределение параметров пара в ступени с НА без навала и с наклонным саблевидным навалом

Было установлено, что снижение скорости пара и соответственно числа Маха до величин менее 1.4 (рисунок 6) упрощает профилирование таких сечений и не требуется специального

сверхзвукового профилирования. Для снижения волновых потерь достаточно на спинке профиля в корневой области обеспечить прямые участки.

Увеличение степени реактивности в корневой области расширяет диапазон устойчивой работы, предотвращая возникновение обратных токов пара в корне при ухудшении вакуума или уменьшении расхода пара. В среднем сечении параметры пара почти не меняются. В периферийной области при увеличении угла навала статическое давление за НА снижается, что приводит к уменьшению перепада давления над бандажом рабочей лопатки и снижению надбандажной протечки.

Третья глава посвящена разработке нового НА последней ступени мощной паровой турбины (рисунок 7). В процессе проектирования были поставлены задачи: обеспечить повышение КПД ступени и разместить в НА активные и пассивные системы сепарации влаги и дробления капель для предотвращения эрозии входных кромок рабочих лопаток.

Повышение КПД ступени было достигнуто путем оптимизации аэродинамического профиля НА. Для этого была создана параметрическая модель профиля НА с 9-ю варьируемыми параметрами. Цикл операций (перестройка модели профиля НА и расчетной сетки, газодинамический стационарный 3D расчет и обработка результата расчета)

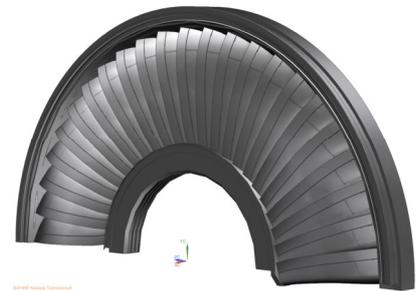


Рисунок 7 – Направляющий аппарат

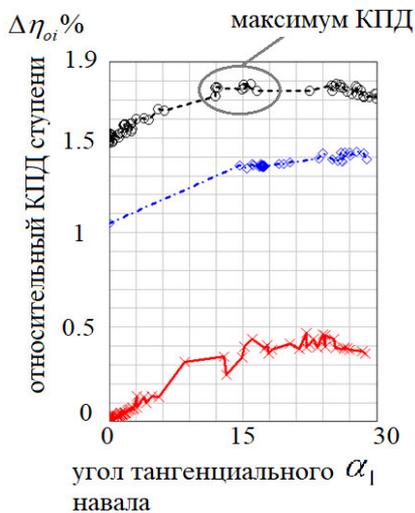


Рисунок 8 – Изменение относительного КПД ступени при различных углах осевого (—×—) угол 0°, —◇— угол 15°, —○— угол 30°) и тангенциального навала.

был замкнут программой-оптимизатором IOSO. В качестве целевой функции был выбран КПД ступени, а в качестве ограничения – расход пара через ступень. При увеличении угла осевого навала уменьшается высота НА по «горлу» канала и уменьшается пропускная площадь канала. Заданный расход пара обеспечивался путем изменения угла установки профиля НА. Наибольшее относительное повышение КПД проектируемой ступени составило 1,8% и было достигнуто при применении комбинации переменного по высоте осевого и тангенциального навалов (рисунок 8). При этом угол осевого навала плавно увеличивается к периферийному сечению до значения 30°, а угол тангенциального навала плавно увеличивается к корневому сечению до значения 15°.

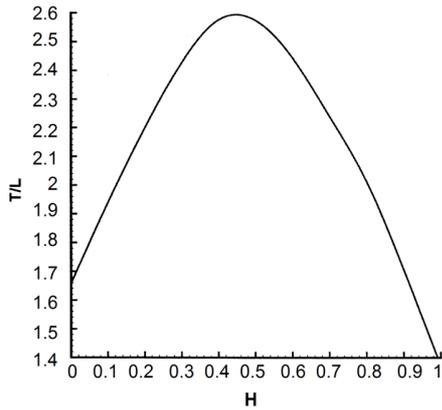


Рисунок 9 – Распределение по высоте ступени H отношения величины шага T к осевому зазору L

увеличенного осевого зазора, на периферийном обводе между НА и рабочим колесом удалось расположить две ловушки для сбора влаги (рисунок 10). Для сбора влаги перед ступенью на обводе диафрагмы, формирующем вход в отбор пара из проточной части выполнена кольцевая проточка (рисунок 10), а скругленная форма наружной части обода в области кольцевой проточки предотвращает образование отрывов и пульсаций потока на входе в НА в периферийном сечении. Расположение и форма проточки, а также расположение ловушек для сбора влаги защищены патентом на изобретение «Направляющая лопатка ступени цилиндра низкого давления паровой турбины» RU 2789652 С1, оформленным в процессе выполнения данной работы.

В четвертой главе приведено описание компоновки и основных систем крупномасштабного экспериментального стенда испытания отсеков



Рисунок 11 – Сборка проточной части модельной турбины

Также, на основании анализа результатов серии оптимизационных расчетов было выявлено и запатентовано (изобретение «Последняя ступень турбины» RU 2790505 С1.) оптимальное распределение по высоте ступени H отношения величины шага T к осевому зазору L (рисунок 9). При таком распределении в периферийной области обеспечивается увеличенный зазор между НА и входной кромкой рабочей лопатки, необходимый для изменения вектора движения капель влаги в сторону основного потока пара, и соответственно уменьшения энергии удара капель о входную кромку. За счет

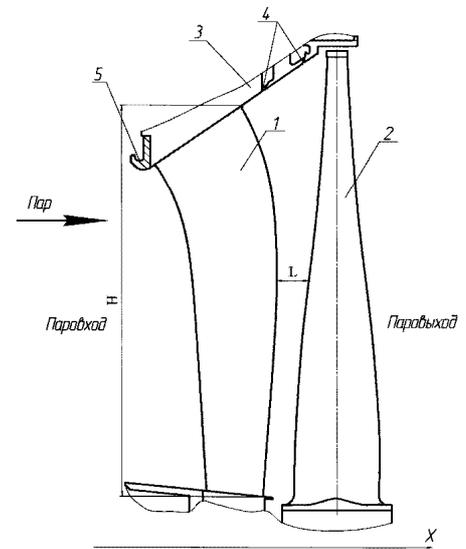


Рисунок 10 – Ступень турбины: 1 – направляющий аппарат, 2 – рабочее колесо, 3 – обод, 4 – ловушки для сбора влаги, 5 – кольцевая проточка, H – высота НА, L – осевой зазор

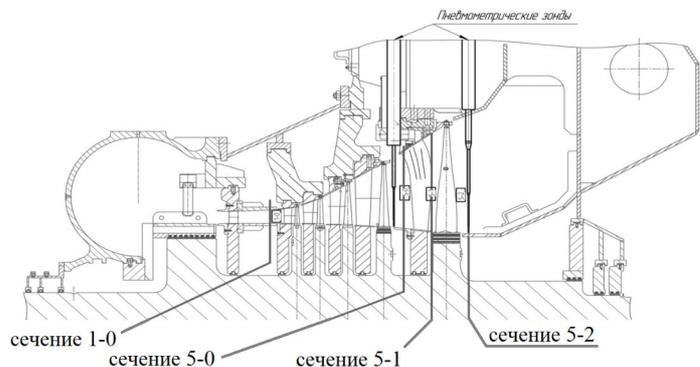


Рисунок 12 – Расположение контрольных сечений в проточной части стенда ЭТПН-5

ступеней низкого давления ЭТПН-5.

На стенде ЭТПН-5 проведены испытания разработанного направляющего аппарата в составе пятиступенчатого отсека цилиндра низкого давления мощной паровой турбины (рисунок 11). Частота вращения модельной турбины составляла 3000 об/мин, температура пара перед проточной частью 150 °С, номинальный расход пара 56,4 кг/с, отношение среднего диаметра к длине рабочей лопатки последней ступени 2,7. Испытания проводились при расходах пара от 20% до 110% от номинального. Также, в процессе испытаний варьировалось давление в конденсаторе от 2,8 кПа до 15 кПа.

На рисунке 12 показана схема расположения контрольных сечений проточной части экспериментальной турбины. В сечении 1-0 проводились измерения полного и статического давления и полной температуры. В сечениях 5-0, 5-1 и 5-2 помимо стационарно установленных датчиков давления также проводилось измерение углов потока пара, давления, температуры и влажности телескопическими зондами.

На рисунке 13 приведено сопоставление полученных в результате расчета распределений полного давления и угла выхода потока α_2 за ступенью с экспериментальными данными. Наибольшее отклонение результатов расчета от эксперимента достигается в корневой области и составляет менее 0,6 кПа. Отклонение угла выхода потока на среднем сечении связано с наличием промежуточной связи (снаббера) на рабочей лопатке. При проведении численного эксперимента связь не моделировалась.

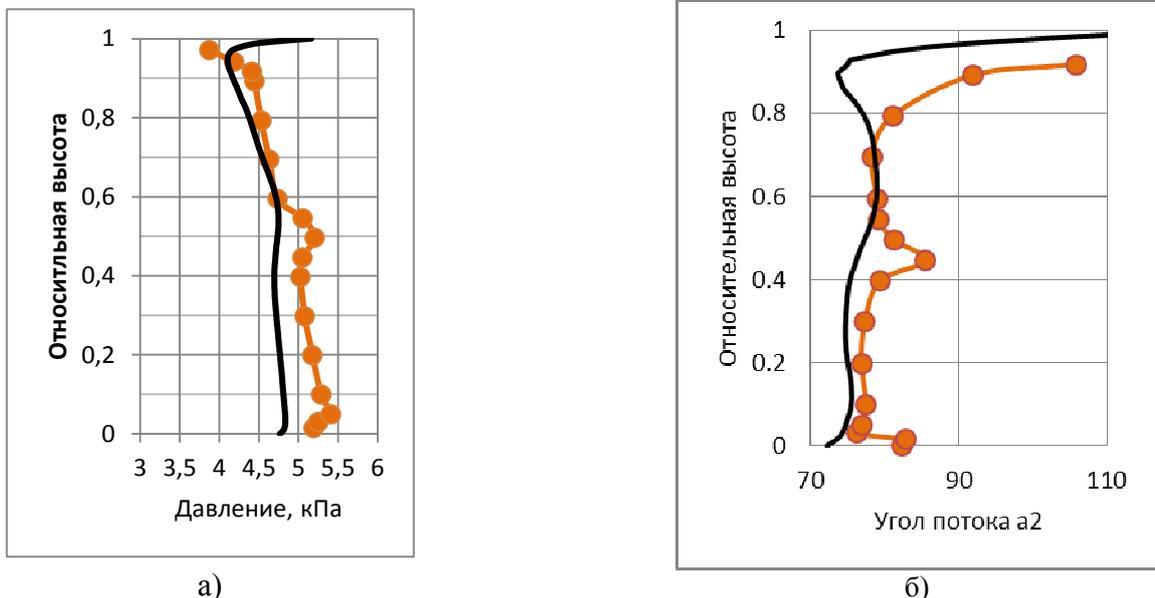


Рисунок 13 – Сравнение результатов трехмерного газодинамического расчета с экспериментальными данными: а – распределение полного давления по высоте ступени за рабочим колесом; б – распределение угла α_2 по высоте ступени за рабочим колесом (— эксперимент — расчет)

Анализ результатов испытаний подтвердил заложенные при проектировании аэродинамические характеристики лопаточного аппарата последней ступени, а результаты численного эксперимента хорошо совпали с полученными на стенде экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика и представлен подробный алгоритм проектирования направляющих аппаратов, включающий в себя автоматизированные циклы оптимизации геометрии лопаточного аппарата с целью повышения КПД проточной части и расширения диапазонов устойчивой работы турбины.

2. Разработана система уравнений, описывающая все возможные положения образующей выходной кромки аэродинамического профиля НА и позволяющая создавать параметрические модели НА, применимые для задач оптимизации лопаточного аппарата последней ступени.

3. Выполнена классификация различных форм тангенциального навала и приведены интервалы изменения коэффициентов системы уравнений для каждой формы навала. Данные интервалы позволяют существенно повысить эффективность автоматизированных оптимизационных циклов за счет сокращения области перебора варьируемых параметров, влияющих на форму навала профиля.

4. Разработана и использована для численного эксперимента трехмерная математическая модель 4-х ступенчатого отсека низкого давления паровой турбины. На основе сопоставления результатов трехмерных газодинамических расчетов и экспериментальных данных, полученных при испытании указанного выше отсека низкого давления на натурном паровом стенде в масштабе 1:1 сделан вывод о возможности применения для решения инженерных задач модели турбулентности $k-\omega$ SST, модели равновесного влажного пара, при численном моделировании течения пара в проточных частях низкого давления путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в трехмерной стационарной постановке.

5. Разработан современный направляющий аппарат с развитой системой сепарации влаги и комбинированным навалом аэродинамического профиля НА, обеспечивший относительное повышение КПД на величину до 1.8% новой ступени отсека ЦНД по сравнению со ступенью с НА традиционной конструкции с радиально установленными выходными кромками направляющих лопаток.

6. Выполнена подготовка и проведены испытания 5-и ступенчатого отсека низкого давления с разработанным направляющим аппаратом на натурном стенде ЭТПН-5 в масштабе М1:2. Анализ результатов испытаний подтвердил заложенные при проектировании аэродинамические характеристики лопаточного аппарата последней ступени. Разработанный направляющий аппарат применен в последних ступенях цилиндров низкого давления новой отечественной тихоходной турбины мощностью свыше 1200 МВт.

7. Выполнен критический анализ научных статей отечественных и зарубежных авторов и патентной информации с глубиной поиска 40 лет по конструкции диафрагм и направляющих лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин. Выявлены перспективные направления для дальнейшего совершенствования конструкции направляющих аппаратов – применение комбинированных форм навала профиля НА, внедрение активных и пассивных систем сепарации влаги, применение полых направляющих лопаток с развитыми каналами отвода влаги и вдува пара для дробления капель влаги.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК по искомой специальности

1. А.А. Ивановский, Ю.К. Петреня, А.М. Тюхтяев, В.Р. Вилданов, А.Д. Градусов Флаттерный анализ как один из этапов разработки рабочих лопаток предельной длины. // Турбины и Дизели. 2024. №2(113). С. 10-14
2. Гаев В.Д., Евдокимов С.Ю., Тюхтяев А.М. Повышение конкурентоспособности ПТУ за счет расширения их функциональных возможностей и повышения эксплуатационных качеств. // Турбины и Дизели. 2023. №6(111). С. 68-73
3. Гаев В.Д., Евдокимов С.Ю., Тюхтяев А.М. Сравнительный анализ экономичности проточных частей многоступенчатых паровых турбин. // Турбины и Дизели. 2023. №6(111). С. 80-84
4. Хоменок Л.А., Фельберг Л.А., Бокучава Н.Ю., Ивановский А.А., Козачук С.Н., Тюхтяев А.М. Исследование влажно-парового потока в последней ступени ЦНД экспериментальной паровой турбины. // Надежность и безопасность энергетики. 2022. Том 15 №3. С. 175-182

Статьи в журналах из перечня ВАК по смежной специальности

1. Захаров А.В., Шпензер Г.Г., Тюхтяев А.М. Устойчивость потока в последних ступенях низкого давления паровых турбин на переменных режимах // Научно-технические ведомости СПбГПУ 2014 № 1(190). С. 70-74
2. Тюхтяев А.М., Ласкин А.С., Захаров А.В. Потери кинетической энергии потока по высоте направляющего аппарата последней ступени мощных паровых турбин. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 66-81
3. Шпензер Г.Г., Захаров А.В., Тюхтяев А.М. Устойчивость потока в последних ступенях цилиндров низкого давления паровых турбин. // Научно-технические ведомости СПбГПУ 2014 № 3(202). С. 54-61

Статьи в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science

1. Гаев В.Д., Иванов С.А., Тюхтяев А.М. Современные отечественные паровые турбины мощностью свыше 1200 МВт для АЭС. // Электрические станции. 2021. №7(1080). С. 2-8
2. Москаленко А.В., Тюхтяев А.М., Ковалев Д.М., Долганов А.Г., Ивановский А.А., Черников В.А., Рассохин В.А. Повышение точности измерений газодинамических параметров в последних ступенях ЦНД с помощью современной системы траверсирования потока при исследованиях на натурном стенде. // Теплоэнергетика. 2023. №5. С. 78-87

Публикации в сборниках конференций

1. Архипова Л.П., Тюхтяев А.М. Расчет двух последних ступеней цилиндра низкого давления мощной паровой турбины в трехмерной постановке с учетом влажного пара. // В сборнике: Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Будущее машиностроения России. Москва, 26-29 сентября 2012г. / МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 315-316
2. Тюхтяев А.М., Ласкин А.С. Трехмерная оптимизация направляющего аппарата последней ступени цилиндра низкого давления. // В сборнике: Неделя Науки СПбГПУ. Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. 2014. С. 75-77

Патенты РФ на изобретения

1. Патент RU 2789652 С1 РФ. FO1D 9/04 (2006.01), FO1D 4/14 (2006.01) 07.02.2023 Направляющая лопатка ступени цилиндра низкого давления паровой турбины. А.М. Тюхтяев, К.М. Усачев, А.Г. Долганов, А.А. Ивановский, О.В. Векшина, У.О. Хлопкова
2. Патент RU 2793874 С1 РФ. FO1D 25/30 (2006.01), FO1D 25/12 (2006.01) 07.04.2023 Паротурбинная установка с охлаждением элементов проточной части цилиндра низкого давления на малорасходных режимах. Евдокимов С.Ю., Усачев К.М., Тюхтяев А.М., Гусев Ю.В.
3. Патент RU 2790505 С1 РФ. FO1D 25/32 (2006.01), FO1D 9/04 (2006.01) 21.02.2023 Последняя ступень турбины. Ивановский А.А., Долганов А.Г., Усачев К.М., Тюхтяев А.М., Карпов А.Д.
4. Патент RU 2793871 С1 РФ. FO1D 9/04 (2006.01), FO1D 5/30 (2006.01) 07.04.2023 Наборная диафрагма паровой турбины. К.М. Усачев, С.Б. Ананьина, С.Ю. Евдокимов, А.М. Тюхтяев, О.В. Векшина.