

На правах рукописи



Лисянский Александр Степанович

**РАЗРАБОТКА МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН
ДЛЯ БЫСТРОХОДНОЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ АЭС**

Специальность 05.04.12

«Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в ОАО «Силловые машины» («Ленинградский Металлический завод»), г. Санкт-Петербург

Научный консультант:

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Петреня Юрий Кириллович,

Заместитель Генерального директора –
Технический директор ОАО «Силловые машины»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Бродов Юрий Миронович,

Директор Уральского энергетического института,
заведующий кафедрой «Турбины и двигатели»
Уральского федерального университета
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

доктор технических наук,
профессор

Мильман Олег Ошеревич,

Генеральный директор ЗАО «Турбокон»,
заведующий кафедрой «Общей физики»
Калужского государственного университета
им. К.Э.Циолковского,
г. Калуга

доктор технических наук,
профессор

Давиденко Николай Никифорович,

Директор Проектно-конструкторского филиала
ОАО «Концерн Росэнергоатом»,
г. Москва

Ведущая организация:

ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «11» ноября 2014г. в « 16 » 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, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences.html> ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
Д 212.229.06 к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

По данным Международного энергетического агентства доля атомной энергетики в мировом энергетическом балансе составит 16% к 2030 году. Мощность АЭС в России к 2030 году увеличится на 28 ГВт. Их доля от всей выработки электроэнергии в России составит 25%. В последние годы Росатомом за рубежом построены АЭС «Тяньвань» в Китае, АЭС «Бушер» в Иране, АЭС «Куданкулам» в Индии. В планах Росатома строительство по российским проектам АЭС: 28 энергоблоков в России и 22 энергоблока за рубежом.

В построенных Росатомом энергоблоках отечественных и зарубежных АЭС мощностью 1000 МВт применена реакторная установка ВВЭР-1000. В новых проектах Росатома предусмотрено применение реакторной установки ВВЭР-1200 и турбоустановки мощностью 1200 МВт. Разработка паротурбинных установок для этих проектов требовала учёта существенных различий в проектных требованиях (по мощности турбины, по температуре и расходу охлаждающей воды, по габаритным и весовым ограничениям и т.д.). Идёт строительство Ленинградской АЭС-2, Нововоронежской АЭС-2, Белорусской АЭС. В ближайших планах - строительство Курской АЭС-2, Смоленской АЭС-2. Росатом планирует строительство по российским проектам АЭС в Индии, Иране, Турции, Бангладеш, Вьетнаме, Иордании и других странах. Из вышесказанного очевидна актуальность темы данной работы, связанной с разработкой и созданием отечественных быстроходных паровых турбин большой мощности для АЭС с реакторными установками ВВЭР мощностью 1000 и 1200 МВт.

Цель работы состоит в разработке и создании на основе расчётно-экспериментальных исследований быстроходных паровых турбин АЭС большой мощности, обладающих высокими показателями экономичности, надёжности, технологичности и низкими затратами на их изготовление, монтаж и эксплуатацию.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

— Анализ тенденций развития атомной энергетики и паротурбостроения для АЭС. Обоснование направлений исследований и разработок новых быстроходных паровых турбин большой мощности для АЭС.

— Разработка тепловых схем и определение термодинамических параметров паротурбинных установок (ПТУ) большой мощности для АЭС.

— Расчётно-экспериментальные исследования, разработка конструкции и создание новой титановой рабочей лопатки последней ступени увеличенной пропускной способности и повышенной вибрационной надежности.

— Расчётно-экспериментальные исследования новых способов упрочнения рабочих лопаток паровых турбин.

— Стендовые и опытно-промышленные исследования, разработка, освоение в производстве новых надбандажных сотовых и концевых втулочных уплотнений ЦВД.

— Расчётно-экспериментальные газодинамические исследования входных и выходных патрубков паровых турбин, с учетом проектных ограничений их размеров.

— Разработка, стендовые и опытно-промышленные исследования новой конструкции высоконагруженных крупногабаритных опорных подшипников.

— Разработка, стендовые и опытно-промышленные исследования новых конструкций регулирующего клапана греющего пара СПП и быстродействующей редукционной установки (БРУ-К).

— Разработка комплексных конструкторско-технологических решений для изготовления и освоения в эксплуатации головных образцов быстроходных паровых турбин большой мощности с 3-мя и 4-мя ЦНД, узлов и оборудования ПТУ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

— получены обширные расчётно-экспериментальные данные по газодинамическим, тепловым и прочностным исследованиям ответственных узлов быстроходных паровых турбин большой мощности (995-1200 МВт);

— впервые получены результаты расчетных и экспериментальных исследований по созданию новых высокоэффективных входных и выходных патрубков мощных паровых турбин, в том числе и для условий проектных ограничений их размеров;

— получены, впервые в отечественной практике, результаты разработки и обоснования новых высокоэффективных проточных частей ЦНД с применением переменного тангенциального навала направляющих лопаток;

— впервые в отечественной практике проведены разработки и исследования в обоснование конструкции высоконагруженных опорных подшипников с использованием гидropодъема сферы вкладышей;

— разработаны оригинальные, защищенные патентами, конструкции новых высоконагруженных опорных подшипников мощных паровых турбин;

— впервые в мировой практике получены результаты исследования, разработки и применения в промышленных условиях способа ионной имплантации ионами азота для защиты длинных титановых рабочих лопаток от эрозии и фреттинг-износа;

— на основе исследований, впервые для использования в турбинах АЭС, разработаны длинные рабочие титановые лопатки из сплава BT-6;

— выполнены расчётно-экспериментальные исследования, разработка и промышленное внедрение новых конструкций уплотнений, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения;

— получены результаты расчётных, стендовых, промышленных исследований, осуществлена разработка новых конструкций регулирующего клапана греющего пара СПП и клапана быстродействующей редуционной установки;

— разработаны новые усовершенствованные тепловые схемы турбоустановок с быстроходными паровыми турбинами рекордного уровня мощности для АЭС при специальных проектных требованиях.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны и внедрены конструкторско-технологические решения, позволившие впервые в мировой практике изготовить быстроходные паровые турбины мощностью 1200 МВт для блоков АЭС с ВВЭР.

2. Внедрены конструкторско-технологические решения по применению для длинных титановых лопаток новых способов упрочнения их рабочих поверхностей методом ионной имплантации ионами азота.

3. Разработана конструкция, изготовлены и, впервые в отечественной практике, успешно применены в промышленных условиях АЭС высоконагруженные опорные подшипники быстроходных паровых турбин большой мощности.

4. Разработаны и изготовлены для быстроходных паровых турбин АЭС на основе расчетов и газодинамических исследований новые конструкции высокоэффективных проточных частей, направляющих лопаток с переменным тангенциальным навалом, новых рабочих лопаток последних ступеней ЦНД, новых надбандажных сотовых и концевых втулочных уплотнений, входных и выходных патрубков турбин.

5. Созданы и модернизированы экспериментальные установки и стенды для исследования основных узлов мощных паровых турбин для АЭС (установка виброналадки лопаток, паротурбинный натурный стенд, аэродинамические стенды

входных и выходных патрубков, регулирующих клапанов греющего пара и БРУ-К).

6. Внедрены новые конструкторские разработки, получен опыт изготовления и эксплуатации паровых турбин и оборудования ПТУ мощностью 1060 МВт с 4-мя ЦНД для АЭС «Тяньвань», мощностью 1014 МВт и 995 МВт с 3-мя ЦНД для АЭС «Бушер» и АЭС «Куданкулам», разработаны и изготовлены турбины мощностью 1200 МВт с 4-мя ЦНД для Нововоронежской АЭС-2 (НВАЭС-2) и Ленинградской АЭС-2 (ЛАЭС-2).

Достоверность результатов и выводов обеспечивается:

- использованием современных, в том числе трехмерных, вычислительных методов и программ газодинамических, тепловых и прочностных расчетов;
- использованием трехмерных методов конструирования, имеющих положительный опыт применения в практике проектирования;
- применением современных методов и измерительных средств экспериментальных исследований в стендовых и промышленных условиях;
- положительными результатами пусконаладочных работ, гарантийных испытаний и опытом эксплуатации в условиях АЭС.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Выбор основных направлений разработок и исследований новых быстроходных паровых турбин большой мощности для АЭС.
2. Результаты исследований, разработок и внедрения усовершенствованных конструкций новых быстроходных турбин мощностью 995-1060 МВт с тремя и четырьмя ЦНД.
3. Результаты исследований, разработок, внедрения в производство новых конструкций и технологий изготовления ключевых узлов паровых турбин: рабочих лопаток, подшипников, уплотнений, входных и выходных патрубков, клапанов.
4. Результаты разработки и внедрения в производство новых быстроходных паровых турбин АЭС мощностью 1200 МВт.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах: Заседание Научного совета РАН по проблемам энергетики, 2013г., Санкт-Петербург, СПбГПУ; Семинар по атомной энергетике, 2013г., Санкт-Петербург, ОАО «Силовые машины» - МЭИ; XI Научно-техническая

конференция «Повышение эффективности, надежности, ресурса действующего и вновь создаваемого энергетического оборудования» 11 октября 2012г., С.-Петербург; Международная конференция «Russia Power – 2010», март 2010 г., Москва; Научно-техническая конференция ОАО ВТИ, 2002 г.; Вторая Всероссийская научно-практическая конференция "Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем" 4-6 июня 2012г., Москва, НИУ МЭИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 статьи и получено 22 патента на изобретения и полезные модели.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 329 страницах текста и содержит 171 рисунок, 46 таблиц и список литературы из 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны перспективы сооружения энергоблоков АЭС по российским проектам с учетом сценариев развития атомной энергетики. Отмечено, что актуальными являются разработки и исследования по созданию отечественных быстроходных паровых турбин большой мощности для АЭС. Показано, что возрастающие требования к повышению технических показателей ПТУ для АЭС, а также проектные ограничения по машинному залу и охлаждающей воде, определяют выбор объектов исследований и разработок.

В главе 1 приводится обзор состояния, предпосылки и факторы развития атомной энергетики и паротурбостроения для АЭС. Доля выработки электроэнергии на АЭС наиболее значительна в промышленно развитых странах и в некоторых из них достигает 75% от общего объема. В России доля АЭС в выработке электроэнергии составит около 25% в 2030 году против 16,8% в 2013 году (рисунок 1).

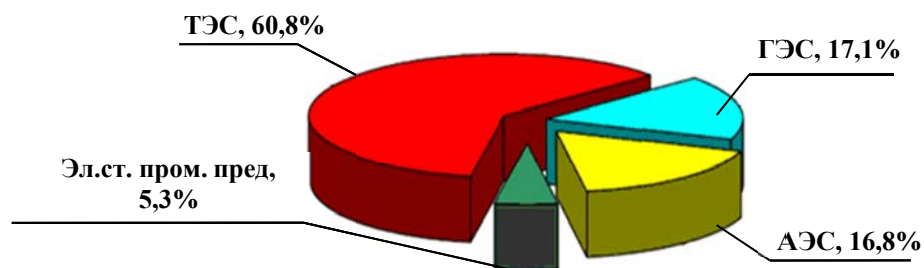


Рисунок 1 – Структура выработки электроэнергии в 2013 году по типам электростанций ЕЭС России

Показаны перспективы поставок паротурбинного оборудования на АЭС России и зарубежных стран по российским проектам (рисунок 2). В ближайшие 20-25 лет ожидается преобладающий ввод на АЭС паротурбинных установок с начальным давлением насыщенного пара 6-9 МПа на АЭС с водо-водяными реакторами типа ВВЭР.

Отмечено, что наибольшее число турбин, находящихся в эксплуатации на тепловых и атомных электростанциях, являются быстроходными. Переход большинства зарубежных фирм на создание «тихоходных» паровых турбин АЭС (на половинное число оборотов) был вынужденным и связанным с трудностями в создании длинных рабочих лопаток для обеспечения большой проходной площади последних ступеней быстроходных турбин большой мощности. Россия развивает «быстроходное» направление конструкций паровых турбин АЭС, создав уникальную рабочую лопатку из титана с длиной рабочей части 1200 мм. Быстроходные турбины ОАО «Силовые машины» для АЭС и ТЭС с этой титановой рабочей лопаткой – конкурентоспособная и экспортоориентированная продукция мирового технического уровня. Это доказывается на основе сравнения быстроходных и тихоходных паровых турбин и анализа возможности дальнейшего развития быстроходных паровых турбин для АЭС.



Рисунок 2 – Вводы мощностей АЭС по российским проектам в России и за рубежом

Показано, что, по результатам независимых тепловых испытаний на АЭС и расчетных оценок, турбоустановки с быстроходной турбиной К-1000-60/3000 и с тихоходной турбиной К-1000-60/1500 имеют практически равную экономичность и высокую надежность. При этом, неоспоримыми преимуществами быстроходных турбин АЭС, по сравнению с тихоходными, остаются их меньшие размеры и вес. Отмечается, что создание рабочих лопаток длиной более 1200 мм, обеспечивающих увеличение площади выхода пара, рост начальных параметров пара перед турбиной, а также возможность перехода к ухудшенному вакууму, вследствие дефицита охлаждающей

воды, позволяют сдвинуть границу мощностей турбин для АЭС, выполняемых быстроходными, в область значений 1600 - 1800 МВт (рисунок 3).

Определены основные типы и технические данные разрабатываемых новых быстроходных турбин для энергоблоков АЭС с РУ типа ВВЭР:

— турбины мощностью 1060 МВт, с четырьмя ЦНД для энергоблоков с РУ типа ВВЭР-1000, расчетный срок службы не менее 40 лет, КПД ПТУ 35,3-35,8%, коэффициент эксплуатационной готовности не менее 99,0 %;

— турбины мощностью 995-1014 МВт, с тремя ЦНД для энергоблоков с РУ типа ВВЭР-1000, расчетный срок службы не менее 40 лет, КПД ПТУ при ухудшенном вакууме около 33,7%, коэффициент эксплуатационной готовности не менее 99,0%;

— турбины мощностью 1200 МВт, с четырьмя ЦНД для энергоблоков с РУ типа ВВЭР-1200, расчетный срок службы не менее 50 лет, КПД ПТУ 37,2-37,3%, коэффициент эксплуатационной готовности не менее 99,0%.

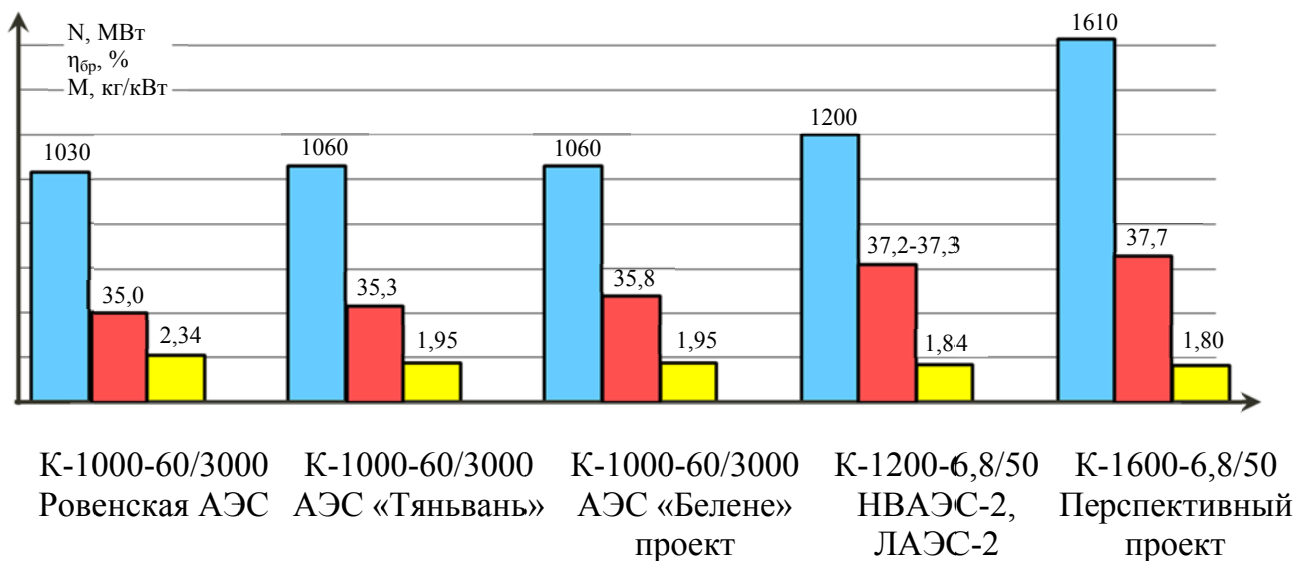


Рисунок 3 - Показатели быстроходных паровых турбин по мере развития их конструкций

■ Мощность, МВт ■ КПД_{бр}, % ■ Удельная металлоемкость, кг/кВт

Для достижения этих уровней мощностей турбин выбраны основные направления исследований и разработок новых быстроходных паровых турбин и их ключевых узлов, включая совершенствование тепловых схем, геометрических характеристик проточной части, нового лопаточного аппарата, новых уплотнений, входных и выходных патрубков, подшипников, клапанов; включая повышение вибрационной надежности валопровода и лопаток, эрозионной стойкости лопаток. В работе принята концепция

сочетания комплекса новых разработок, расчетных исследований, стендовых и промышленных испытаний новых паровых турбин и их ключевых узлов с использованием многократно проверенных лучших технических решений.

Одной из важнейших составляющих диссертационной работы является доведение результатов исследований и разработок до внедрения в проекты, в производство и в промышленные образцы с вводом их в эксплуатацию на АЭС.

Вторая глава посвящена созданию новых паротурбинных установок типа К-1000-60/3000 мощностью 1060 МВт с четырьмя ЦНД для условий работы в энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 с давлением в конденсаторе около 4-5 кПа.

При создании новой паровой турбины К-1000-60/3000 номинальной мощностью 1060 МВт (рисунок 4) проведены расчетно-экспериментальные исследования, выполнены и внедрены новые конструкторские разработки, включающие в себя:

- разработку, исследования и промышленные испытания нового клапана быстродействующей редукционной установки турбины;
- внедрение нового титанового сплава ВТ-6 для рабочих лопаток последних ступеней;
- разработку и внедрение впервые в практике турбостроения нового способа поверхностного упрочнения титановых рабочих лопаток ионно-плазменной имплантацией ионов азота;
- разработку, экспериментальные исследования и испытания нового регулирующего клапана греющего пара СПП повышенной виброустойчивости;
- оптимизацию тепловой схемы, направленную на улучшение технико-экономических показателей турбоустановки, с учетом проектных требований.

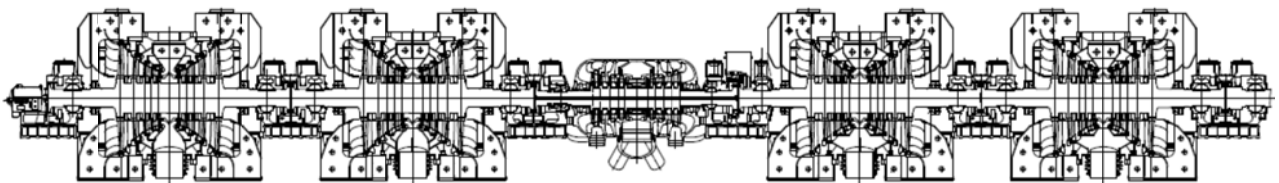
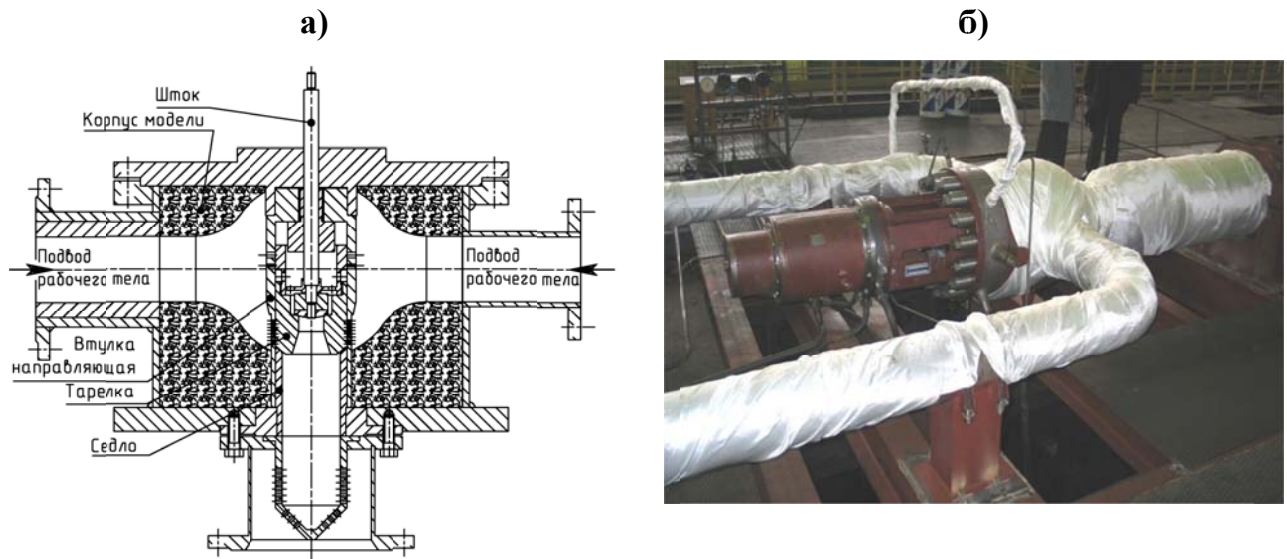


Рисунок 4 - Паровая турбина К-1000-60/3000 для АЭС «Тяньвань» (Китай)

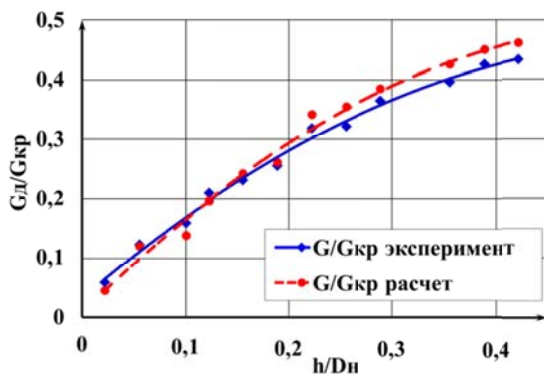
Впервые в практике ОАО «Силловые машины» при проектировании ПТУ для АЭС «Тяньвань» были разработаны, исследованы и изготовлены **клапаны быстродействующей редукционной установки** (рисунок 5), предназначенные для сброса свежего пара в конденсатор. Выполнена газодинамическая отработка

конструкции клапана на испытательном модельном стенде ОАО «Силловые машины», построены его расходные и силовые характеристики.

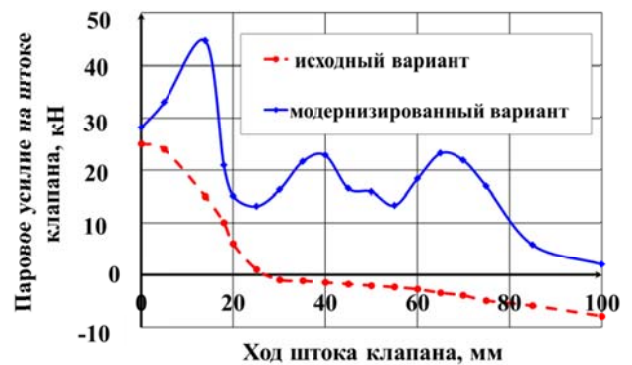


Модель клапана БРУ-К для испытаний на воздушном стенде

Установка ОАО «Силловые машины» для паровых испытаний клапана БРУ-К



Расходные характеристики клапана БРУ-К



Силовые характеристики клапана БРУ-К

Рисунок 5 – Конструкция и результаты модельных (а) и натуральных (б) исследований клапана БРУ-К

Представлены результаты расчётно-экспериментального обоснования конструкции и освоения **рабочих лопаток** длиной **1200 мм** из **титанового сплава ВТ-6**, впервые внедрённых в турбине К-1000-60/3000 для АЭС «Тяньвань». Исследования показали, что по своим характеристикам образцы лопаток из титанового сплава ВТ-6 превосходят образцы из освоенного ранее сплава ТС-5 (таблица 1). Важным свойством нового сплава является его повышенная эрозионная стойкость и износостойкость. Эрозионная

стойкость упрочнённых лопаток из этого сплава возрастает в 1,5 раза, а износостойкость – в 1,5 – 4,3 раза, по сравнению с лопатками из сплава ТС-5.

Таблица 1 – Характеристики образцов титановых сплавов для рабочих лопаток

	Характеристики образцов титановых сплавов	Марка титанового сплава		
		ТС-5 без упрочнения	ВТ-6 без упрочнения	ВТ-6 с упрочнением ионной имплантацией
1	2	3	4	5
1	$\sigma_{0,2}$, МПа	735-882	≥ 804	≥ 804
2	σ_B , МПа	≥ 814	≥ 902	≥ 902
3	δ , %	≥ 8	≥ 10	≥ 10
4	φ , %	≥ 20	≥ 25	≥ 25
5	σ_{-1} , МПа	343-451	≥ 441	≥ 510
6	Твёрдость НВ/НV	269-341 НВ	255-341 НВ	НV (50) ≥ 1200
7	Эрозионная стойкость	1,0	1,1 – 1,2	$\geq 1,5$
8	Износостойкость	1,0	1,1 – 1,2	1,5 – 4,3

Выполнен комплекс исследовательских работ по определению эффективного способа упрочнения контактных поверхностей бандажных полок титановых лопаток и комплекс исследований по защите от эрозионного износа входных кромок титановых рабочих лопаток последних ступеней НД.

Исследованы следующие способы упрочнения:

1. Ионная имплантация ионами азота + вакуумно-плазменное покрытие Ti-TiN.
2. Детонационное покрытие WC + Co(20%).
3. Сверхзвуковое нанесение покрытия WC + Co(10%) + Cr(4%).
4. Электронно-лучевая наплавка.
5. Закалка токами высокой частоты (ТВЧ).

Выполнены усталостные и эрозионные испытания образцов титанового сплава ВТ-6, упрочненных различными способами (рисунки 6 и 7).

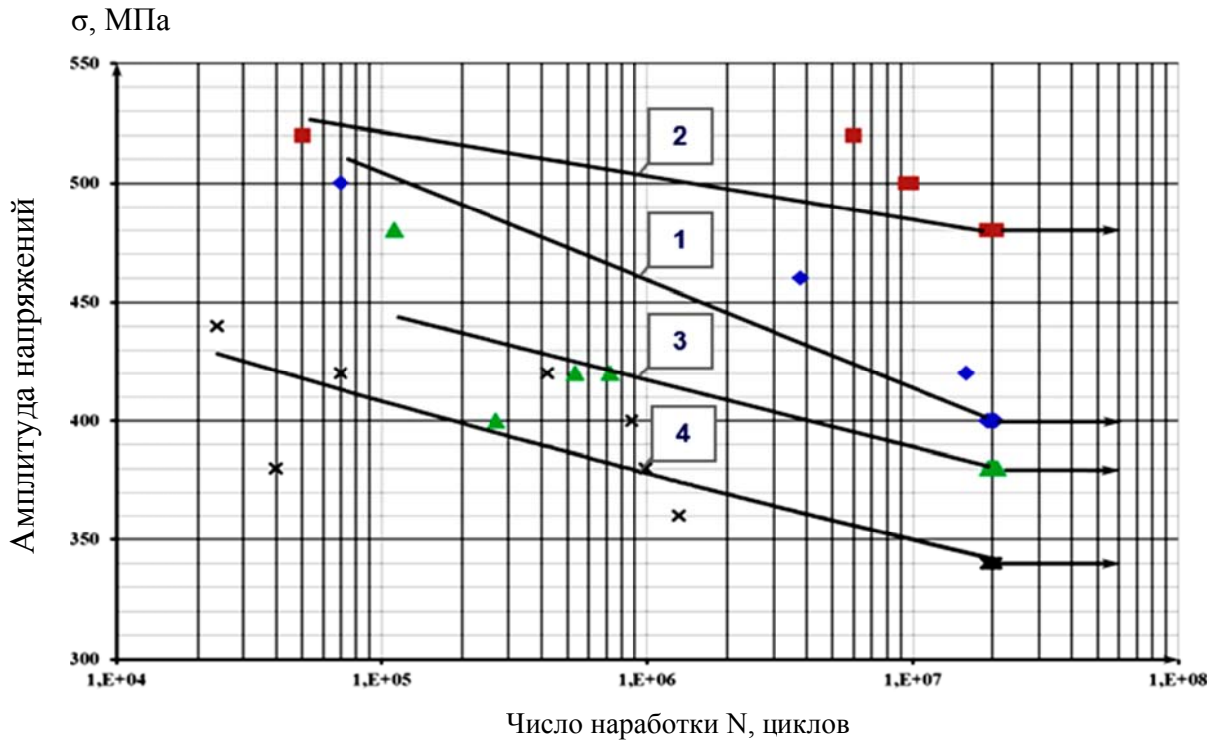


Рисунок 6 – Кривые усталости образцов из титанового сплава ВТ-6 в исходном состоянии и с различными видами упрочнения.

1 - исходное состояние; 2 - ионная имплантация ионами азота + покрытие TiN ($h=9$ мкм); 3 - сверхзвуковое нанесение покрытия $WC+10\%Co+4\%Cr$; 4 - детонационное покрытие $WC+20\%Co$

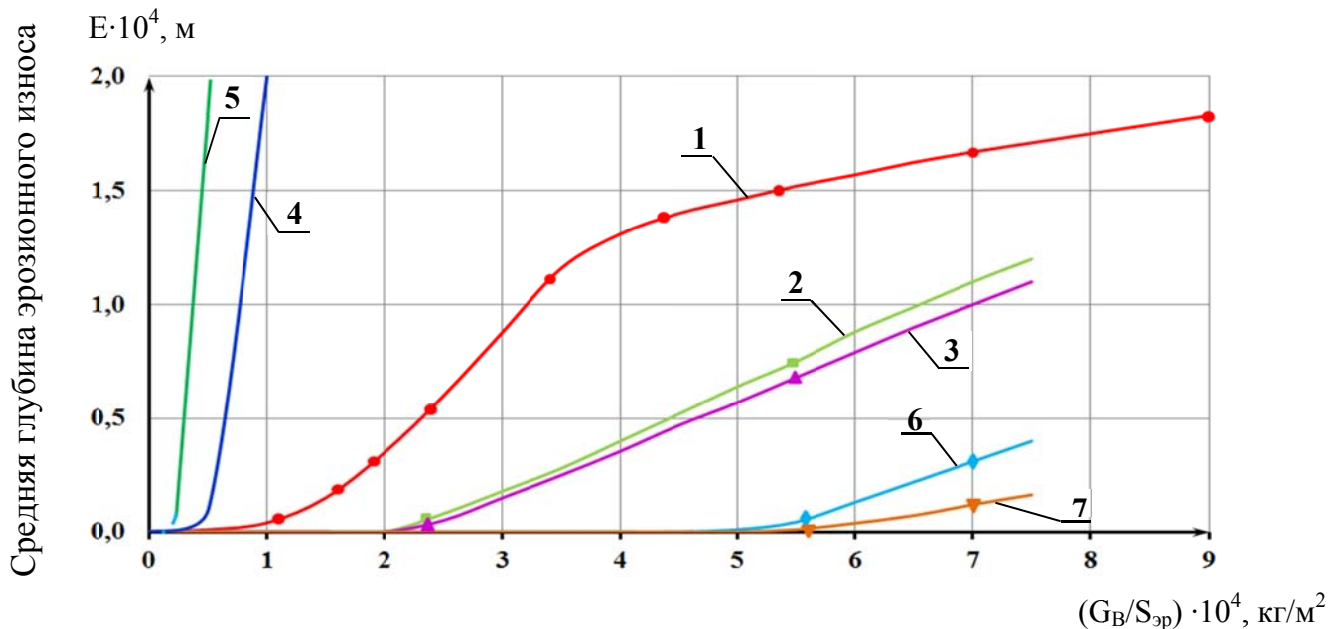


Рисунок 7 – Кривые эрозионного износа образцов титанового сплава ВТ-6 в исходном состоянии и с различными видами упрочнения.

1 - титановый сплав ВТ-6; 2 - ионная имплантация ионами азота + покрытие TiN ($h=9$ мкм); 3 - ионная имплантация ионами азота + покрытие TiN ($h=20$ мкм); 4 - детонационное покрытие $WC+20\%Co$; 5 - сверхзвуковое нанесение покрытия $WC+10\%Co+4\%Cr$; 6 - электронно-лучевая наплавка; 7 - закалка ТВЧ

Наилучшие результаты по усталостной прочности получены для технологии ионной имплантации ионами азота в сочетании с покрытием TiN, что увеличило исходный уровень усталостной прочности титанового сплава ВТ-6 на 20% (рисунок 6).

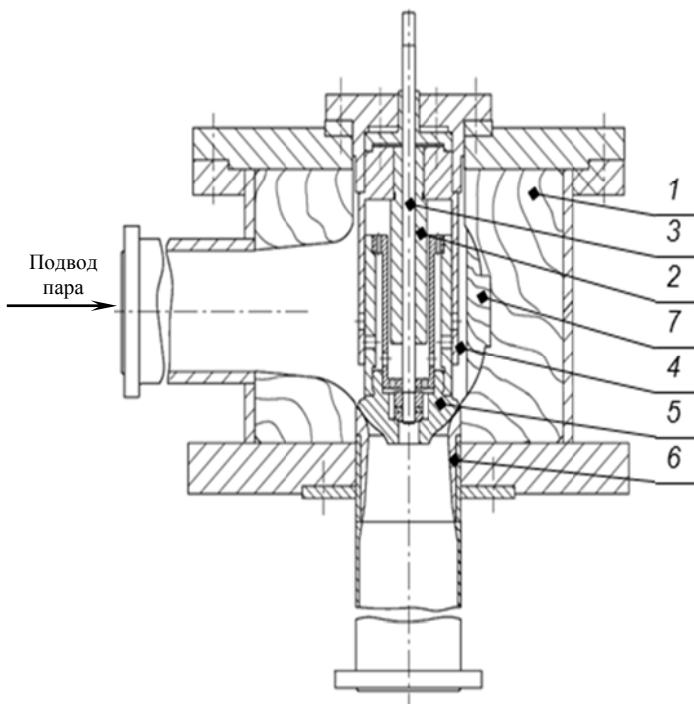
Испытания на эрозионную стойкость образцов из сплава ВТ-6, упрочнённых различными способами (рисунок 7), показали, что наибольшую эффективность из рассматриваемых способов упрочнения дают способы, осуществлённые токами высокой частоты (ТВЧ) и электронно-лучевой наплавкой (ЭЛН).

Однако, указанные способы имеют существенные недостатки: упрочнение закалкой ТВЧ приводит к недопустимой деформации пера лопаток, а электронно-лучевая наплавка снижает предел усталости образцов до 2,7 раза от исходной, т.е. предел усталости падает до 37% от исходного значения неупрочнённого материала.

Анализ результатов исследований на образцах с различными типами упрочнений показал, что лучшим совокупным показателем по усталостной прочности и эрозионной стойкости обладает вариант: ионная имплантация ионами азота + вакуумно-плазменное покрытие нитридом титана (TiN) (кривые 2 и 3, рисунок 7).

Впервые в отечественном турбостроении разработана и освоена технология промышленного упрочнения крупногабаритных титановых рабочих лопаток последних ступеней длиной 1200 мм методом ионной имплантации ионами азота + вакуумно-плазменное покрытие TiN. Спроектированы, изготовлены и освоены вакуумные установки высокой производительности для серийного промышленного упрочнения длинных титановых рабочих лопаток. В период с 2000 по 2013 гг. произведено упрочнение более 7,5 тыс. титановых рабочих лопаток длиной 1200 мм, которые успешно эксплуатируются на атомных и тепловых электростанциях в России и за рубежом.

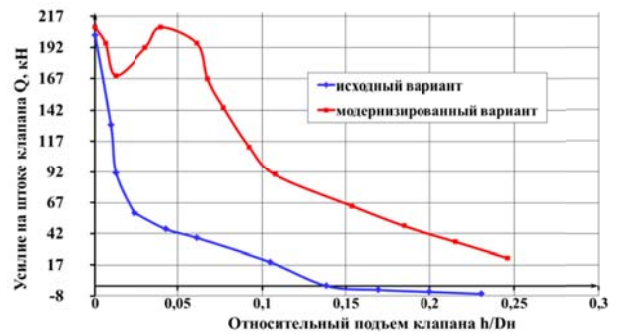
Разработана, исследована и внедрена новая высокоэффективная конструкция регулирующего клапана греющего пара сепаратора-пароперегревателя (СПП) с повышенной виброустойчивостью (рисунок 8). Исследования новой конструкции клапана на воздушной модели (М 1:4) позволили оптимизировать геометрические параметры подгрузочных окон клапана, обеспечив постоянную по направлению паровую подгрузку, и, как следствие, высокую вибрационную надёжность. Промышленные испытания и опыт эксплуатации новой конструкции клапана на АЭС «Тяньвань» подтвердили его высокую эффективность.



- 1 – Паровая коробка
- 2 – Букса клапана
- 3 – Шток
- 4 – Стакан
- 5 - Чашка клапана
- 6 – Седло
- 7 – Рассекатель



Расходные характеристики регулирующего клапана греющего пара



Силовые характеристики регулирующего клапана греющего пара

Рисунок 8 - Конструкция и результаты исследования регулирующего клапана греющего пара СПП

Тепловая схема новой турбоустановки К-1000-60/3000 с четырьмя ЦНД выполнена с учетом обеспечения требований по экономичности и компактности турбоустановки (рисунок 9). Основные решения по тепловой схеме турбоустановки для АЭС «Тяньвань», направленные на выполнение вышеуказанных требований, включают в себя: применение питательных насосов с электроприводом; применение системы регенерации с сокращенным числом ступеней регенерации - с 8-ми до 7-ми; применение деаэратора в однокорпусном исполнении; применение ПНД-1 поверхностного типа, вместо аппарата смешивающего типа, с размещением его в переходных патрубках ЦНД №1-4.

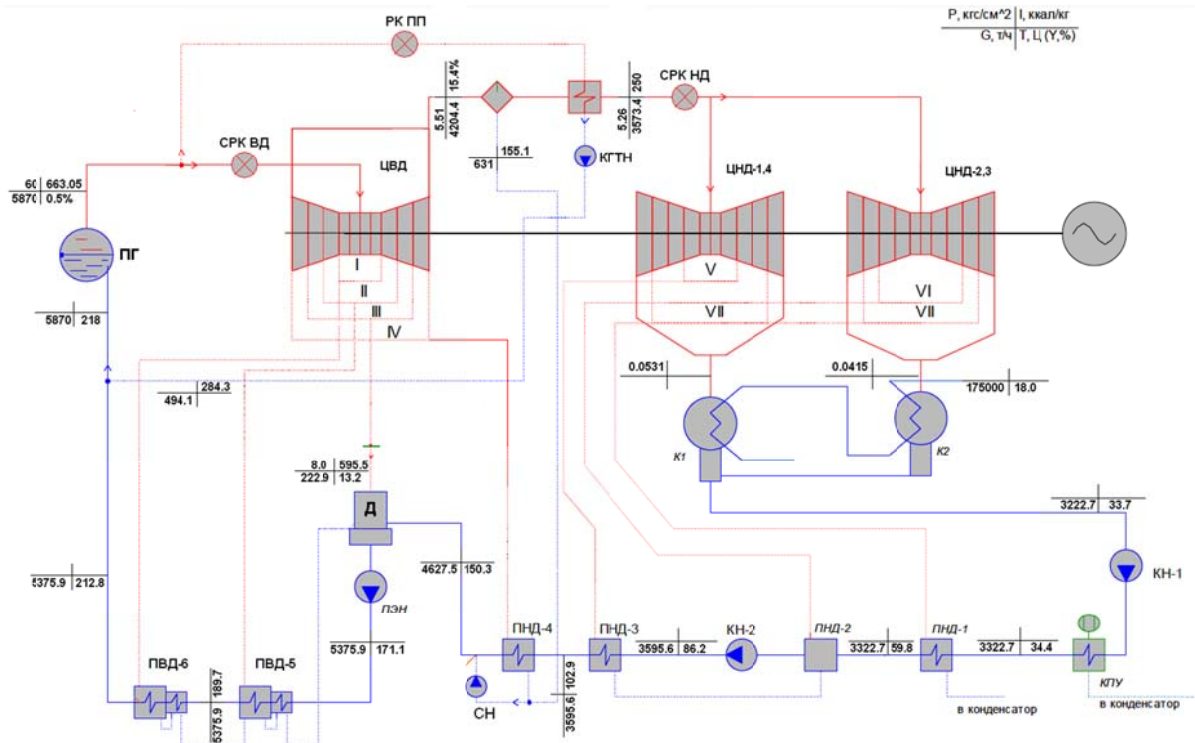


Рисунок 9 – Тепловая схема турбоустановки К-1000-60/3000 для АЭС «Тяньвань» (Китай)

Новые решения по тепловой схеме, конструкции турбины, конструкции вспомогательного оборудования и отдельных видов арматуры турбоустановки обеспечили, по сравнению с достигнутыми в базовой турбоустановке (Ровенская АЭС) повышение показателей экономичности, эксплуатационной надежности, ремонтпригодности, и одновременно позволили уменьшить площадь машинного зала в 1,5 раза, снизить затраты на его сооружение.

Третья глава посвящена созданию паротурбинных установок К-1000-60/3000 с высоконагруженными последними ступенями, конструктивным особенностям турбин с тремя ЦНД, проектированию и отработке новых опорных подшипников и выходных патрубков ЦНД, усовершенствованию тепловых схем.

Рассмотрены варианты конструкции турбин с тремя и четырьмя ЦНД «ЦВД+3ЦНД» и «2ЦНД+ЦВД+2ЦНД» с применением рабочих лопаток последних ступеней ЦНД длиной 1200 мм и 1000 мм. Сравнение экономичности этих вариантов турбины показало определенное преимущество конструктивной схемы с четырьмя ЦНД «2ЦНД+ЦВД+2ЦНД» с рабочими лопатками длиной 1000 мм. Для АЭС «Бушер» применена конструктивная схема турбины «ЦВД+3ЦНД» с титановой рабочей лопаткой последней ступени длиной 1200 мм (рисунок 10) из-за проектных ограничений.

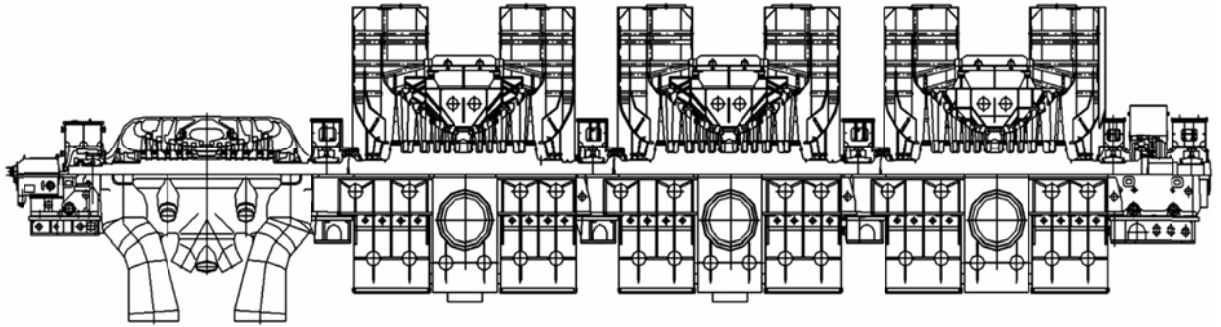


Рисунок 10 – Паровая турбина К-1000-60/3000-3 для АЭС «Бушер» (Иран)

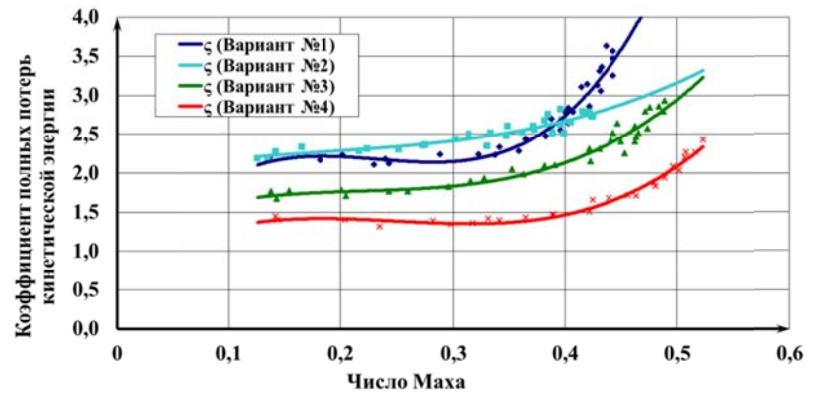
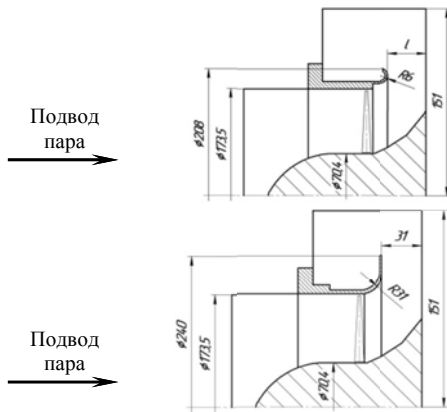
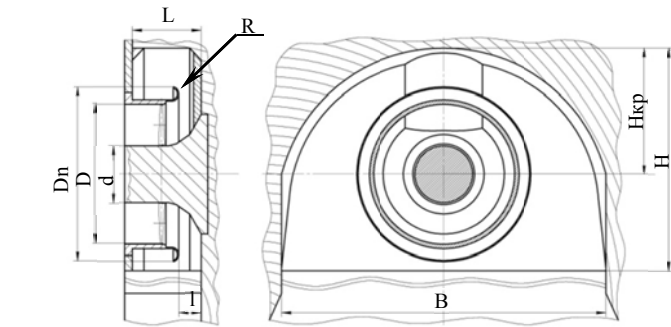
Создание новой конструкции турбины под существующий фундамент на АЭС «Бушер» потребовало разработки новой конструкции ЦНД, малоопорной конструкции валопровода и новой конструкции высоконагруженных опорных подшипников.

Разработаны и применены в проточной части ЦНД направляющие лопатки с переменным тангенциальным навалом, обеспечивающие увеличение реактивности в нижней половине ступени, при снижении градиента ее изменения по высоте лопатки, и повышение КПД ЦНД на 1,3%.

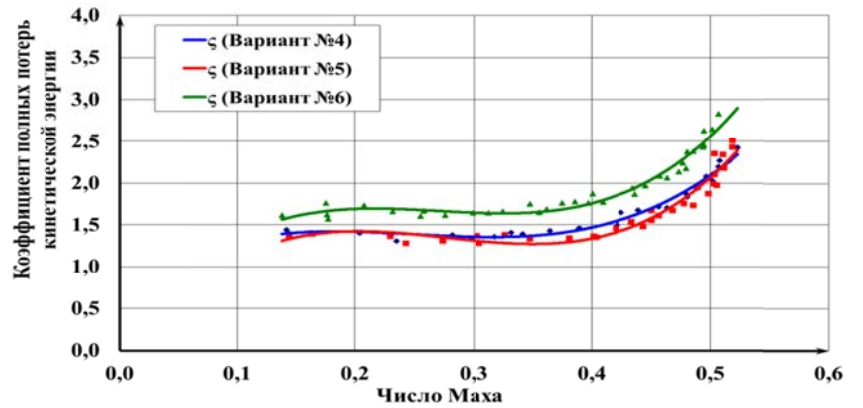
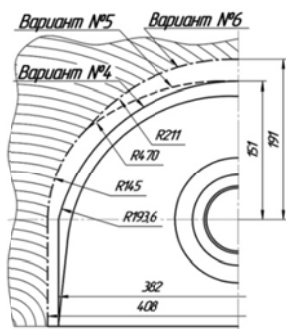
С целью минимизации осевых габаритов ЦНД были выполнены газодинамические исследования на моделях различных вариантов конструкции выходных патрубков ЦНД (рисунок 11). Исследовалось влияние конструктивных элементов патрубка на потери энергии в нем. Отработка оптимальной **конструкции выходного патрубка ЦНД в условиях жёстких ограничений осевых размеров патрубка** выполнялась поэтапно.

На первом этапе оптимизировался периферийный обвод осерадиального диффузора и его осевое местоположение (варианты 1-4). На втором этапе исследовалось влияние ширины и высоты крышки патрубка (варианты 4-6). На третьем этапе исследовалось влияние периферийного обвода диффузора при увеличенных размерах ширины и высоты крышки патрубка (варианты 6-8). На четвертом этапе исследовалось влияние направляющих круговых дефлекторов (варианты 9-12). На пятом этапе исследовалось влияние углубления в торцевой стенке патрубка (варианты 8,13). На шестом этапе исследовалось влияние установки дополнительных элементов жесткости (варианты 9-18). Отработка выходного патрубка ЦНД позволила создать оптимальную конструкцию, обеспечивающую при сокращении на 23,5% его осевого размера минимально возможный коэффициент полных потерь энергии $\zeta = 1,4$.

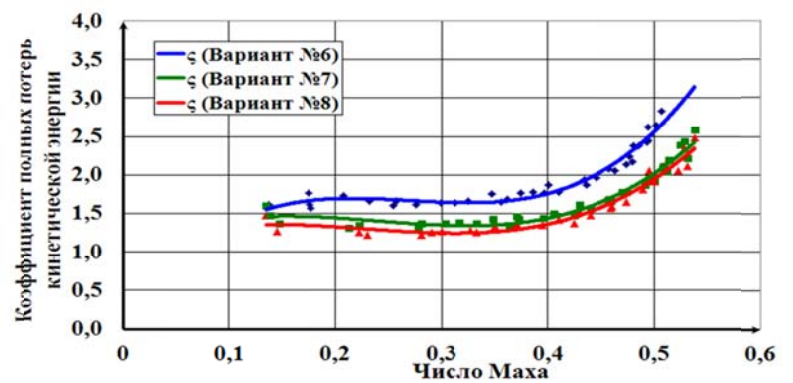
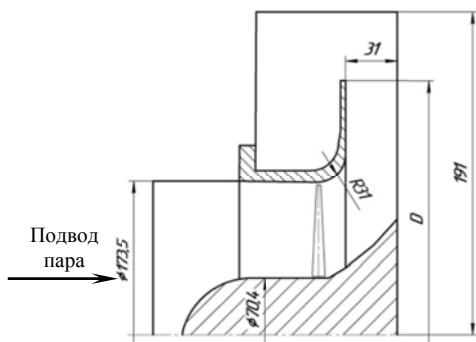
Модель исходного варианта
выходного патрубка ЦНД
п/т К-1000-60/3000-3
для АЭС «Бушер»



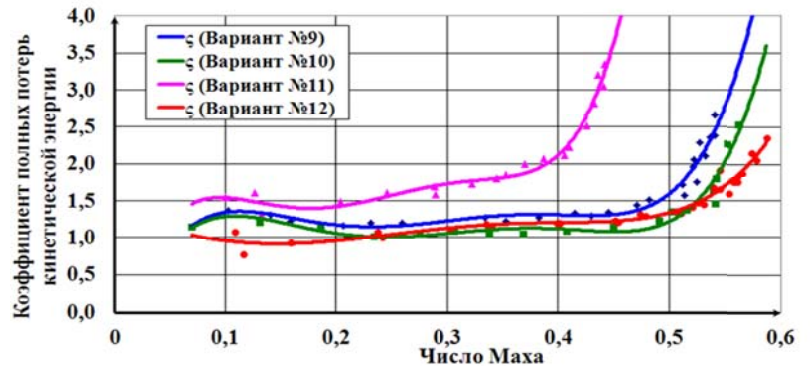
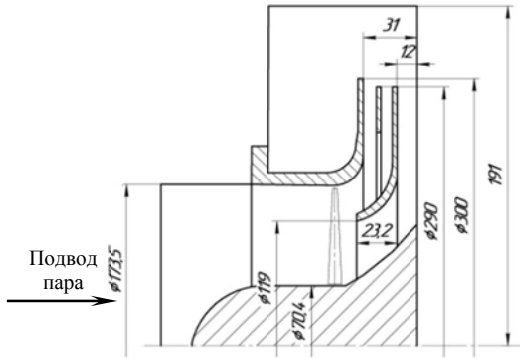
Влияние расположения осерадиального диффузора на эффективность выходного патрубка ЦНД



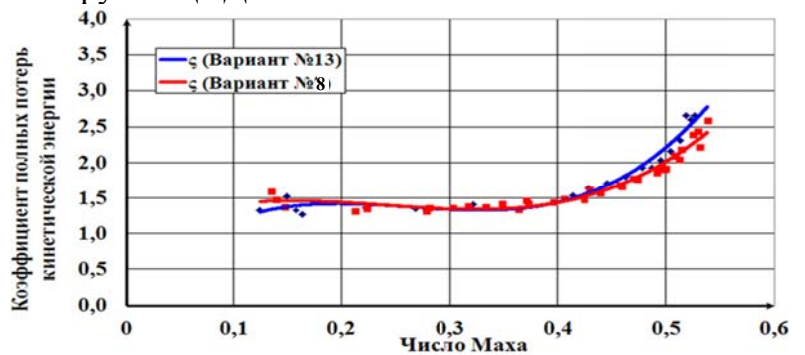
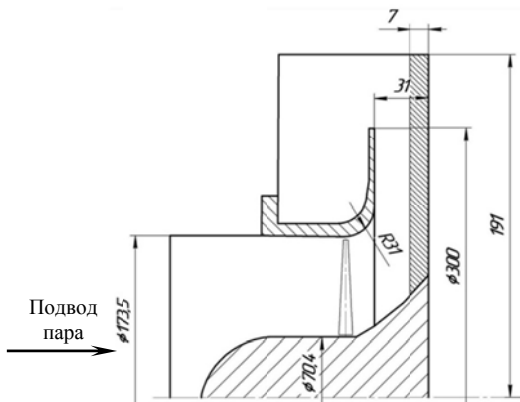
Влияние ширины и высоты крышки выходного патрубка ЦНД на его эффективность



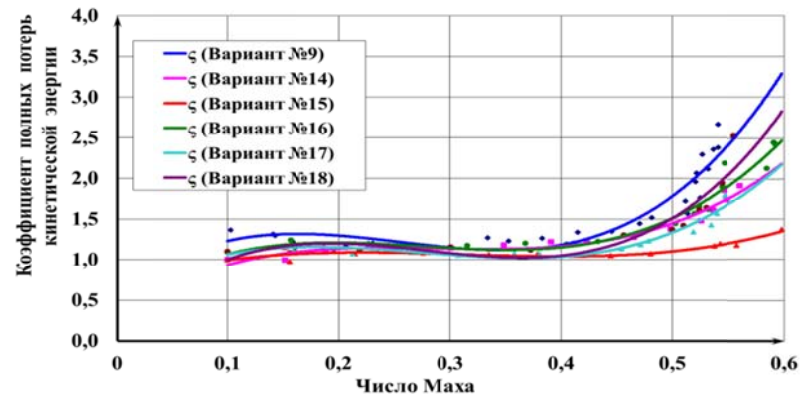
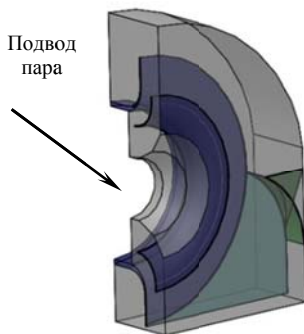
Влияние периферийного диаметра осерадиального диффузора на эффективность выходного патрубка ЦНД



Влияние установки дефлекторов в проточной части на эффективность выходного патрубка ЦНД



Влияние углубления в торцевой стенке выходного патрубка ЦНД на его эффективность



Влияние установки дополнительных элементов жесткости на эффективность выходного патрубка ЦНД

Рисунок 11 – Аэродинамические исследования выходного патрубка ЦНД быстроходной паровой турбины К-1000/60-3000-3 для АЭС «Бушер»

Разработана и внедрена новая **конструкция паровпуска ЦНД** (рисунок 12), обеспечивающая подвод пара только в нижнюю его половину. В такой конструкции пароподвода достигнуто повышение экономичности паровпуска ЦНД, за счет специального проектирования его пароподводящей камеры. Одновременно существенно повышена ремонтопригодность ЦНД.

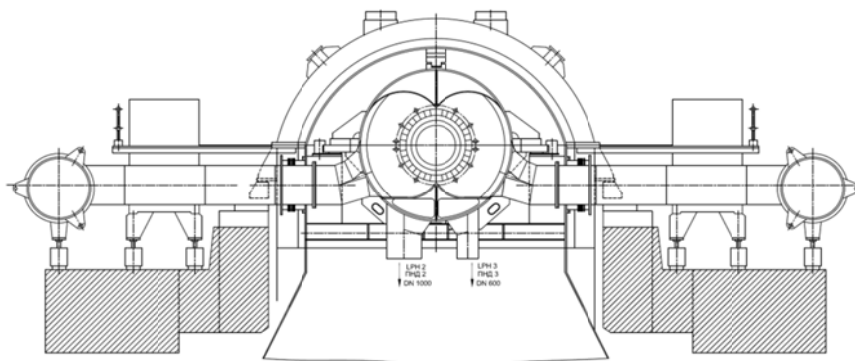
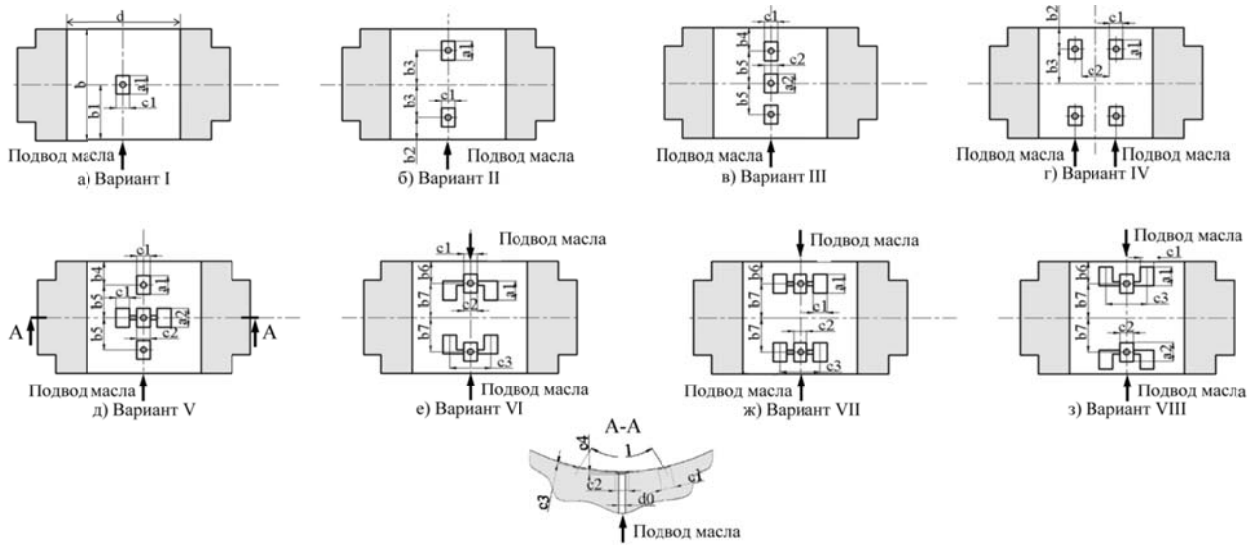


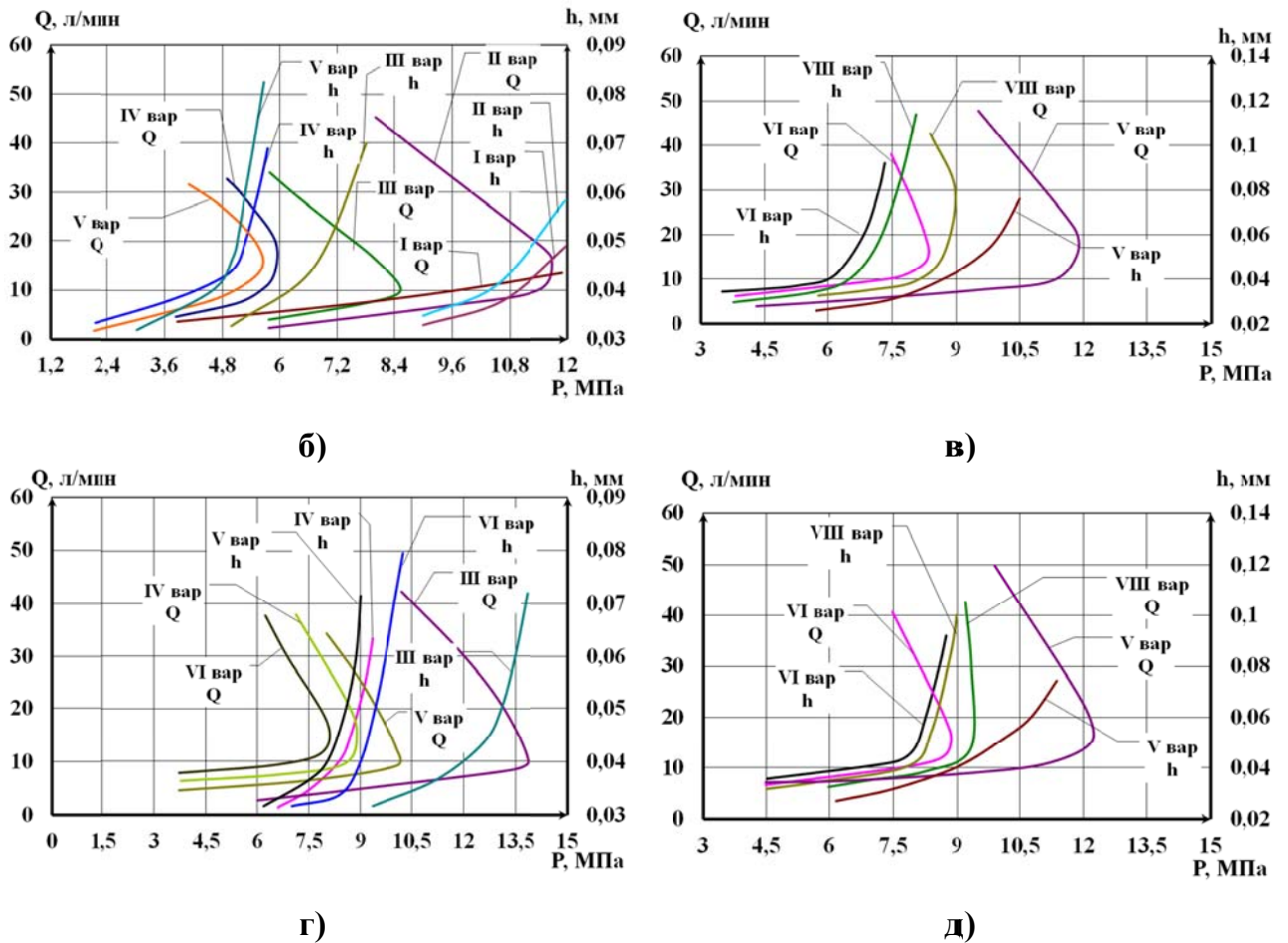
Рисунок 12 - Паровпуск ЦНД паровой турбины К-1000-60/3000-3 для АЭС «Бушер»

Для малоопорной схемы опирания роторов при сокращении осевых габаритов паровой турбины К-1000-60/3000-3 исследованы и разработаны **конструкции крупногабаритных опорных подшипников** повышенной несущей способности, обеспечивающих надежную и экономичную работу при высоких удельных нагрузках в диапазоне 2-3 МПа. При этом для обеспечения повышенной несущей способности подшипников выполнена отработка системы гидроподъема вала. С этой целью были проведены многовариантные исследования характеристик различных конструкций камер гидроподъема вала (рисунок 13). На экспериментальных стендах отработывались опытные вкладыши диаметром 600 и 620 мм (рисунок 14). С учетом полученных экспериментальных результатов впервые в отечественной практике была разработана новая конструкция опорного подшипника для быстроходной турбины АЭС с гидроподъемом сферы вкладыша, обладающая высокой несущей способностью и позволяющая компенсировать эксплуатационные расцентровки роторов турбины (рисунок 14). В ходе испытаний подшипник новой конструкции продемонстрировал высокую несущую способность, уменьшенный расход масла на смазку и потери на трение. Температура баббита в широком диапазоне удельных нагрузок от 2 до 3 МПа не превышала 90 °С.

Сравнительные испытания новой и традиционной конструкции опорных подшипников были проведены на разгонно-балансировочном стенде «Шенк», где были подтверждены высокие демпфирующие характеристики подшипника новой конструкции, способность к самокомпенсации осевых перекосов и устойчивость к возникновению низкочастотной вибрации.

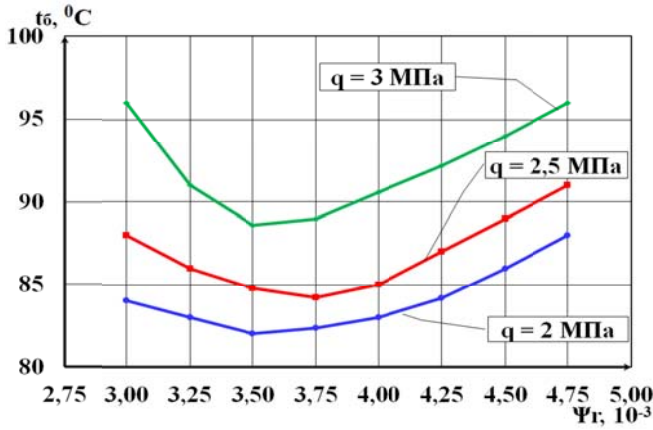


а) Схема расположения камер гидростатического подъема ротора и их геометрические параметры

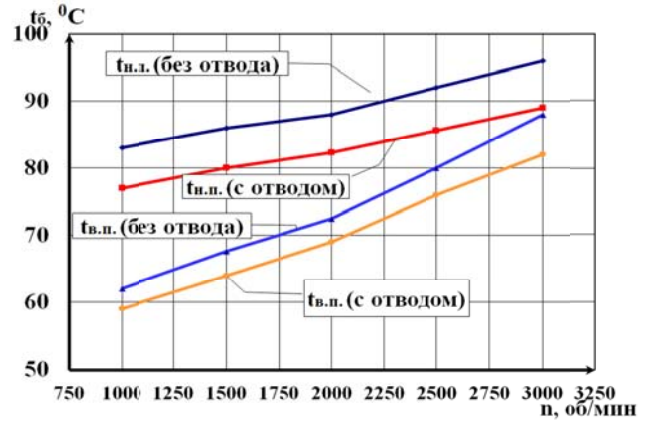


Зависимость расхода масла и всплытия вала от давления в системе гидроподъема:
 б – варианты I - V при удельной нагрузке 0.79 МПа,
 в – варианты V - VIII при удельной нагрузке 2.2 МПа
 г – варианты III - VI при удельной нагрузке 1.6 МПа
 д – варианты V - VIII при удельной нагрузке 3.0 МПа

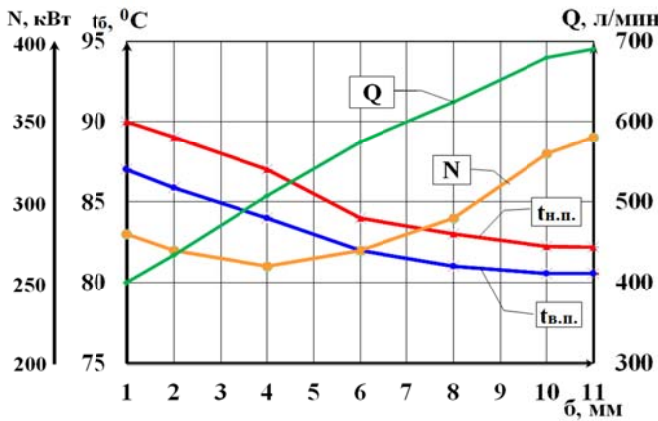
Рисунок -13 Исследования конструкций камер гидростатического подъема ротора



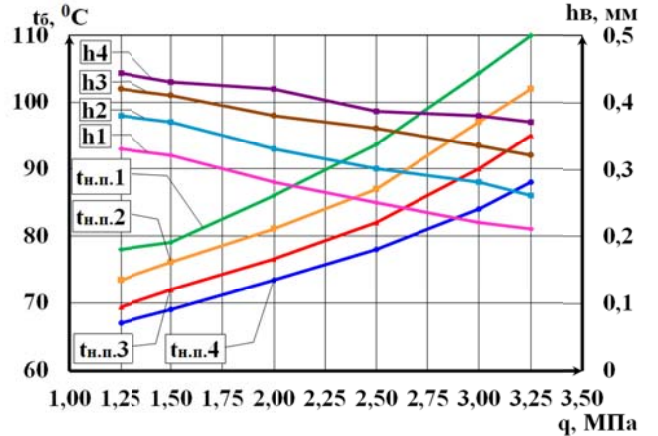
а)



б)



в)



г)

Зависимости температур баббита, потерь на трение, расходов масла и всплытий вала:
а – от величины относительно масляного зазора при различных удельных нагрузках, **б** – от числа оборотов при удельной нагрузке 3 МПа, **в** – от величины торцевых скосов при номинальной частоте вращения и удельной нагрузке 2 МПа, **г** – от удельной нагрузки при номинальной частоте вращения:

- 1 – без отвода смазки;
- 2 – с отводом смазки в нижней половине;
- 3 – с отводом смазки в верхней и нижней половинах;
- 4 – с новым подводом масла и с отводом смазки в верхней и нижней половинах

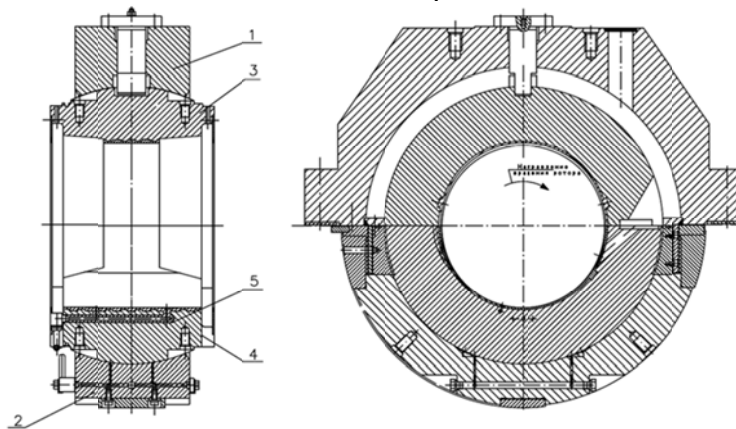


Рисунок 14- Исследование и конструкция нового опорного подшипника повышенной несущей способности турбины К-1000-60/3000-3 для АЭС «Бушер»
 1 - бугель вкладыша; 2 - гидроподъем сферы вкладыша; 3,4 - верхняя и нижняя половины вкладыша; 5 - гидроподъем вала

При разработке тепловой схемы турбоустановки К-1000-60/3000-3 для АЭС «Бушер» решены три взаимосвязанных задачи: достижение высокой экономичности турбоустановки; обеспечение максимально возможной интеграции вспомогательного оборудования турбоустановки фирмы Сименс и сохранение строительных конструкций и размеров машинного зала.

В новой тепловой схеме турбоустановки добавлен регенеративный подогреватель ПНД-4, что позволило адаптировать параметры отборов новой турбины ЛМЗ к системе регенерации турбоустановки фирмы Сименс. Принята схема объединения конденсата греющего пара ПНД-4 с конденсатом из СПП с последующей их закачкой в конденсатный тракт перед деаэратором. Комплексное усовершенствование структуры тепловой схемы и конструкции цилиндров турбины обеспечило повышение электрической мощности на 6 МВт, интеграцию ранее поставленного вспомогательного оборудования фирмы Сименс, а также использование существующих строительных конструкций без увеличения размеров машинного зала. Промышленные испытания подтвердили заявленные высокие гарантийные показатели по экономичности и электрической мощности турбоустановки.

При разработке новой тепловой схемы турбоустановки К-1000-60/3000-2 для АЭС «Куданкулам» ставилась задача снижения затрат на строительство машинного зала. В этой связи, принята новая конструктивная схема турбины «ЦВД+3ЦНД» с титановой рабочей лопаткой последней ступени ЦНД длиной 1200 мм (рисунок 15).

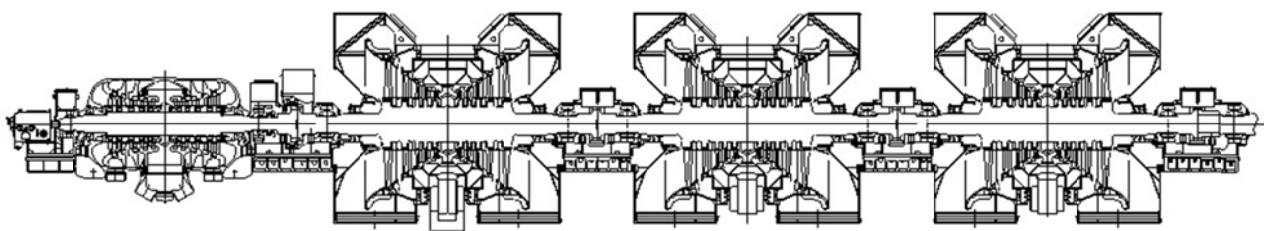


Рисунок 15 – Паровая турбина К-1000-60/3000-2 для АЭС «Куданкулам»

Разработана тепловая схема турбоустановки К-1000-60/3000-2, отличающаяся от схемы турбоустановки с турбиной с 4-мя ЦНД увеличенным давлением промперегрева и давлениями отборов пара из ЦНД и ЦВД. В системе регенерации турбоустановки К-1000-60/3000-2 с тремя ЦНД расчетное давление в деаэраторе принято на уровне

1,1 МПа, вместо давления 0,7...0,8 МПа, принятого в турбоустановке базовой с четырьмя ЦНД.

Разработана новая конструкция корпуса ЦНД, обеспечивающая из каждого ЦНД три отбора пара на регенеративные подогреватели (вместо двух отборов в случае турбины с четырьмя ЦНД). Данное решение позволило организовать симметричные отборы пара из всех трёх ЦНД, с минимальными относительными величинами отборов пара на ПНД-2 и ПНД-3, реализовать удаление влаги с отбираемым паром за 3-ей ступенью из всех ЦНД и, в результате, - повысить КПД проточной части ЦНД и мощность турбоустановки. Проведенная оптимизация тепловой схемы (с уменьшенным числом ступеней регенерации) позволила обеспечить существенное уменьшение размеров машинного зала и затрат на его сооружение.

Четвёртая глава посвящена созданию **паротурбинных установок типа К-1200-6,8/50 в рамках проекта Росатома «АЭС-2006»**. Показано, что для быстроходной турбины К-1200-6,8/50 выполнены исследования и новые конструкторские разработки, обеспечивающие рекордную для быстроходных турбин АЭС мощность и высокую экономичность.

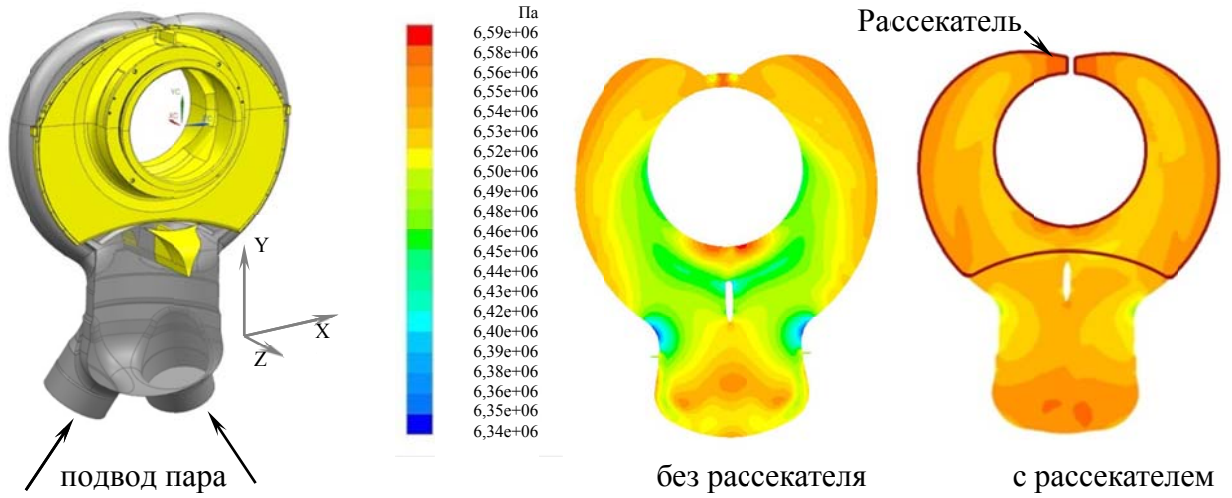
Новый ЦВД конструктивно выполнен с нижним подводом и отводом пара и рассчитан на увеличенный на 10% располагаемый теплоперепад, по сравнению с принятым в ЦВД базовой турбины типа К-1000-60/3000 с 4-мя ЦНД. Тепловые расчеты проточной части ЦВД выявили целесообразность увеличения числа ступеней в каждом потоке с 5 до 6, что обеспечило увеличение КПД ЦВД на 1%.

При проектировании нового ЦВД внедрены новые конструкторские решения:

- проведена аэродинамическая оптимизация новых патрубков паровпуска и паровыпуска ЦВД;
- обеспечена необходимая жесткость корпуса ЦВД увеличенной длины;
- применены (как и в ЦНД) направляющие лопатки всех ступеней с переменным тангенциальным навалом;
- минимизированы потери, связанные с протечками пара через уплотнения.

Отработка новой **конструкции паровпуска ЦВД** выполнена на базе трёхмерной модели (рисунок 16) для двух вариантов: исходного варианта ЦВД, принятого в базовой турбине К-1000-60/3000, и варианта с установкой по оси паровпуска рассекателя, обеспечивающего равномерное распределение потока пара.

В результате проведения расчетной отработки паровпуска ЦВД удалось добиться снижения с 0,5 до 0,42 коэффициента потерь кинетической энергии в конструкции с рассекателем по сравнению с конструкцией без рассекателя.

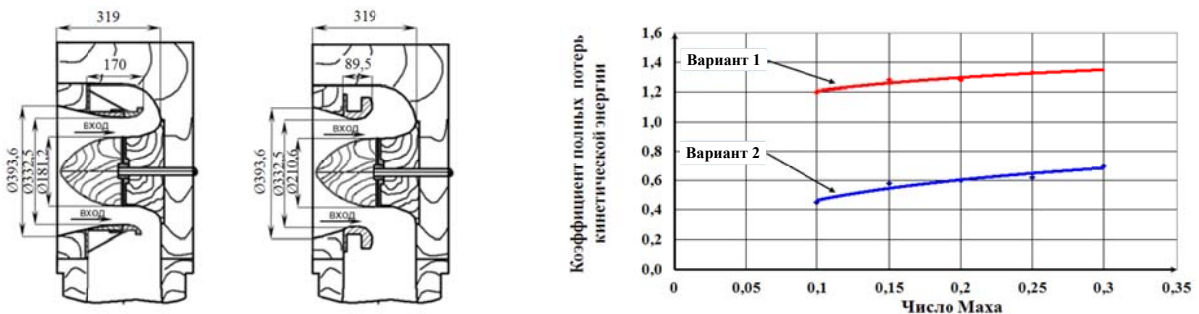


Поле абсолютного давления в плоскости YX

Рисунок 16 - Трехмерная модель паровпуска ЦВД турбины К-1200-6,8/50 и результаты расчета

Проведены экспериментальные исследования двух вариантов конструкции выходного патрубка ЦВД (рисунок 17), отличающихся конфигурацией и расположением осерадиального диффузора относительно задней стенки патрубка. Исследования проводились на воздушных моделях конструкций выходных патрубков. Масштаб моделей 1:6.

Интегральная оценка полных потерь кинетической энергии потока рабочего тела показало преимущество конструкции выходного патрубка ЦВД варианта 2. Коэффициент полных потерь кинетической энергии выходного патрубка в варианте 2 практически в два раза меньше, чем в варианте 1 (рисунок 17).



Вариант 1

Вариант 2

Зависимость коэффициента полных потерь кинетической энергии от числа Маха

Рисунок 17 - Конструкция моделей и результаты исследований выходного патрубка ЦВД турбины К-1200-6,8/50

Отработка **новой конструкции выходного патрубка ЦНД** выполнена для двух вариантов конструкции, отличающихся размерами и осевым расположением осерадиального диффузора (рисунок 18).

Эффективность обоих вариантов конструкции выходного патрубка определялась величиной коэффициента полных потерь кинетической энергии на входе в патрубок.

Исследования выполнены на воздушной модели (М 1:23) и расчетным способом. Коэффициент полных потерь кинетической энергии выходного патрубка в варианте 2 на 7,5% меньше, чем в варианте 1.

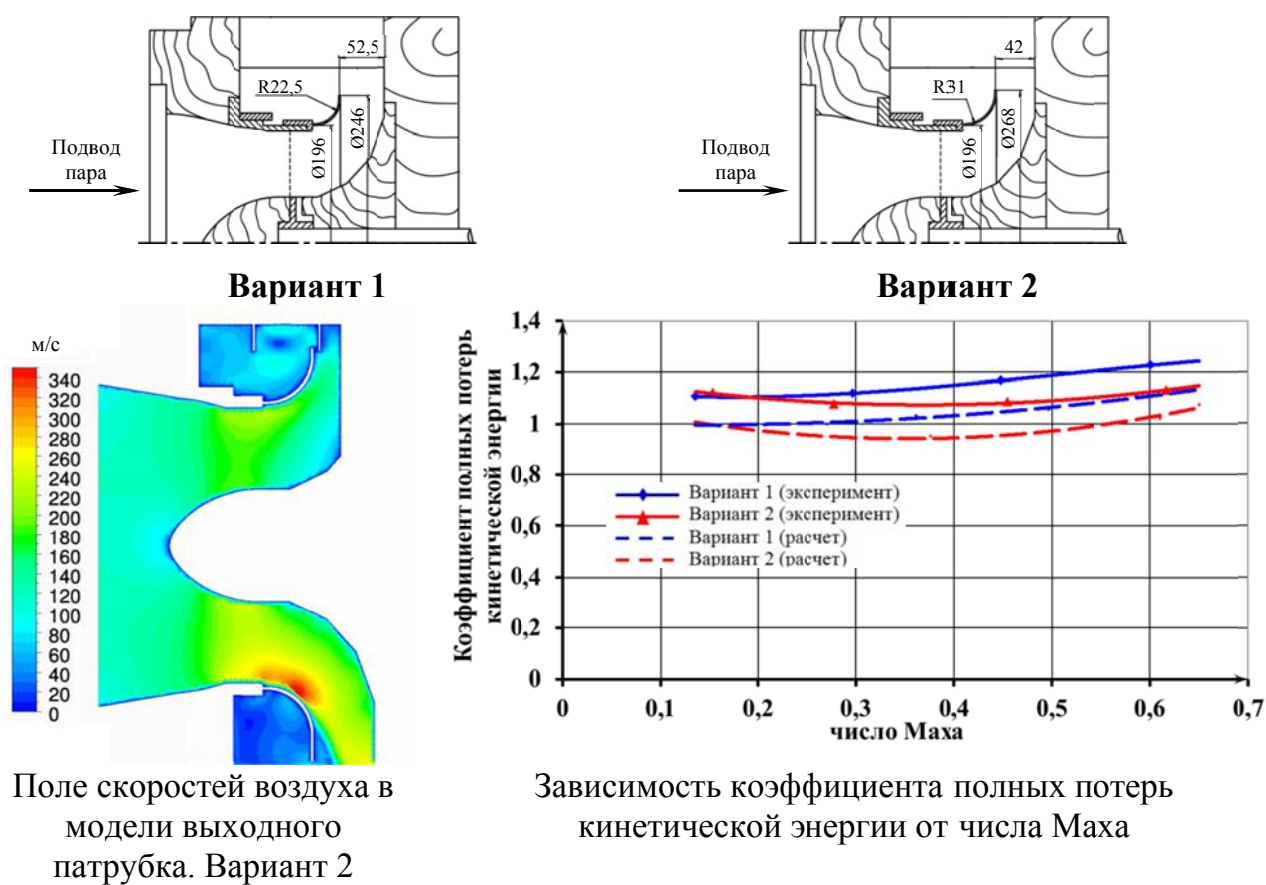
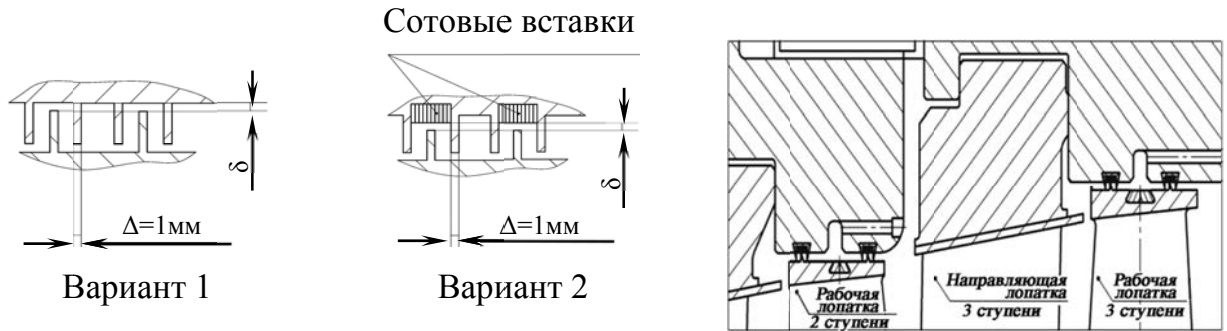


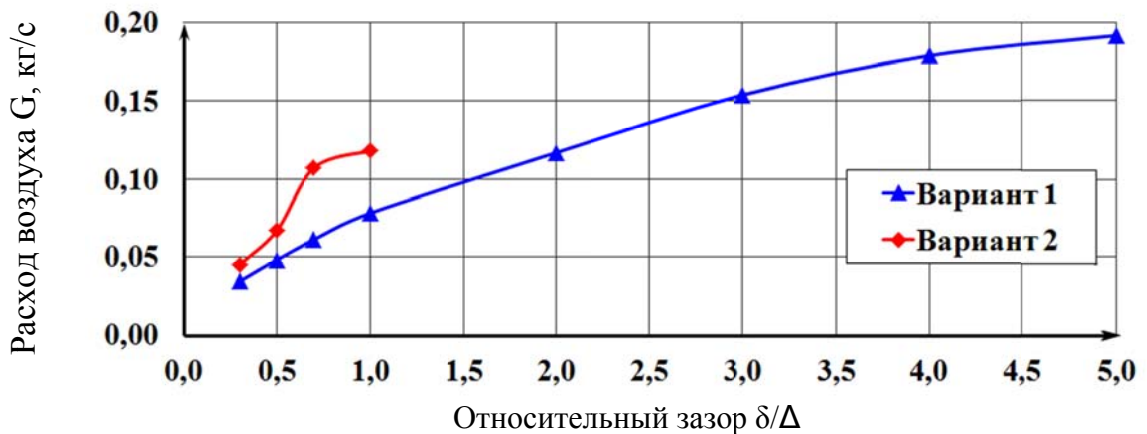
Рисунок 18 - Конструкция модели и результаты исследований выходного патрубка ЦНД турбины К-1200-6,8/50

С целью уменьшения надбандажных протечек пара в ступенях, впервые в истории отечественного атомного турбостроения разработаны, исследованы и внедрены **сотовые надбандажные уплотнения**. Исследования на воздушной модели показали, что при равных радиальных зазорах расход воздуха через уплотнения по варианту 2 несколько больше, чем по варианту 1 (рисунок 19, таблица 2).

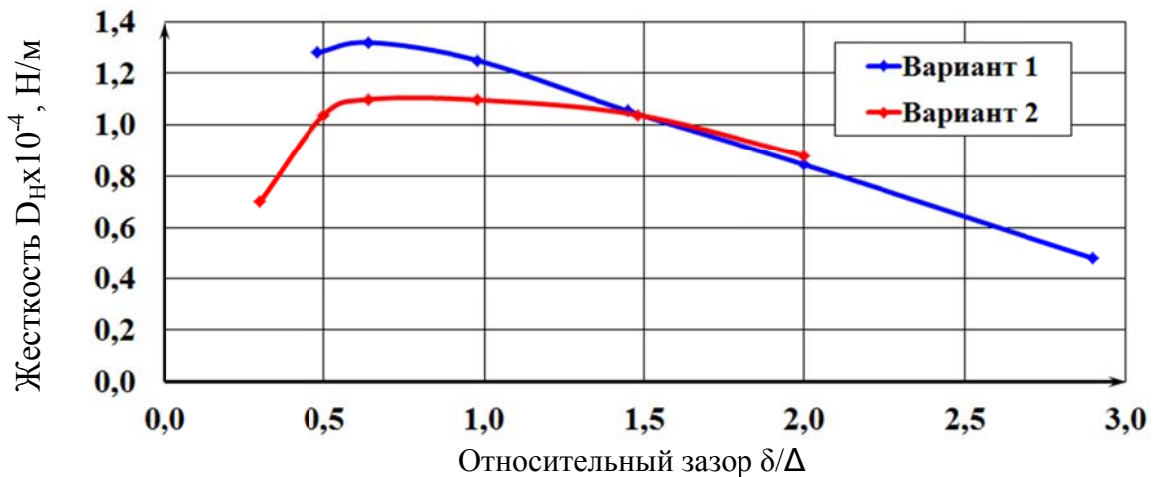


Варианты конструкций надбандажных уплотнений

Сотовые надбандажные уплотнения в проточной части ЦВД



Расход через осерадиальное надбандажное уплотнение для вариантов 1 и 2



Жесткость неконсервативной аэродинамической силы для вариантов 1 и 2

Рисунок 19 - Особенности конструкции и результаты исследований уплотнений
 Вариант 1. Конструкция осерадиального надбандажного уплотнения, примененная в первой ступени ЦВД п/т К-1000-60/3000

Вариант 2. Новая конструкция осерадиального надбандажного уплотнения с сотовыми вставками в ступенях ЦВД п/т К-1200-6,8/50

Таблица 2 – Расход воздуха через надбандажные уплотнения (варианты 1 и 2)

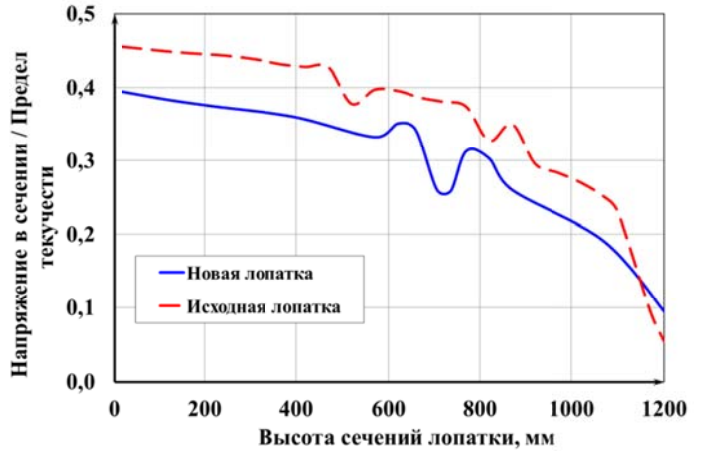
		δ/Δ								
		0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
G кг/с	Вариант 1	0,034	0,048	0,061	0,078	0,0975	0,117	0,154	0,179	0,192
	Вариант 2	0,045	0,067	0,107	0,118	-	-	-	-	-

Опыт эксплуатации подтверждает для варианта 1 минимальную величину рабочего радиального зазора 1,5 мм; при этом расход воздуха составит $G=0,0975$ кг/с. Для варианта 2 минимальная величина рабочего радиального зазора составляет 0,5 мм, чему соответствует расход воздуха $G=0,067$ кг/с. Газодинамические расчеты проточных частей ЦВД и ЦНД показали, что применение сотовых конструкций надбандажных уплотнений в турбине К-1200-6,8/50 повышает КПД новой турбоустановки на 0,2% (относительных), по сравнению с вариантом использования надбандажных уплотнений типовой конструкции, используемой в базовой турбоустановке К-1000-60/3000.

С целью обеспечения надёжной работы турбины К-1200-6,8/50, повышения пропускной способности ЦНД перспективных турбин АЭС, была разработана новая конструкция (рисунок 20) усиленной рабочей лопатки последней ступени длиной 1200 мм (в развитие конструкции успешно эксплуатируемой многие годы исходной лопатки длиной 1200 мм турбины К-1000-60/3000). Для обеспечения высокого КПД последней ступени с новыми усиленными лопатками, одновременно с переходом на увеличенный размер хорды, оптимизировано обтекание профилей лопатки по всей высоте с сохранением относительного шага.

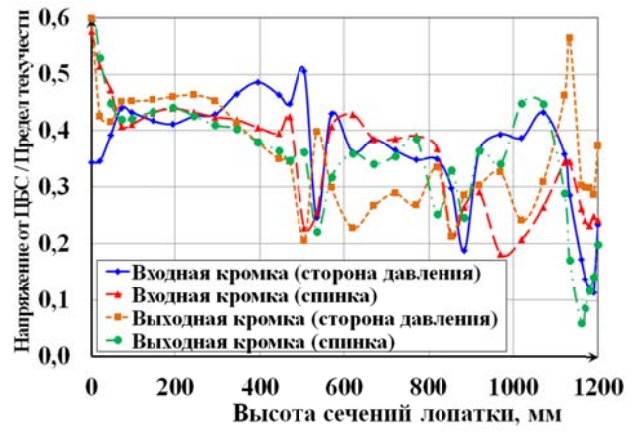
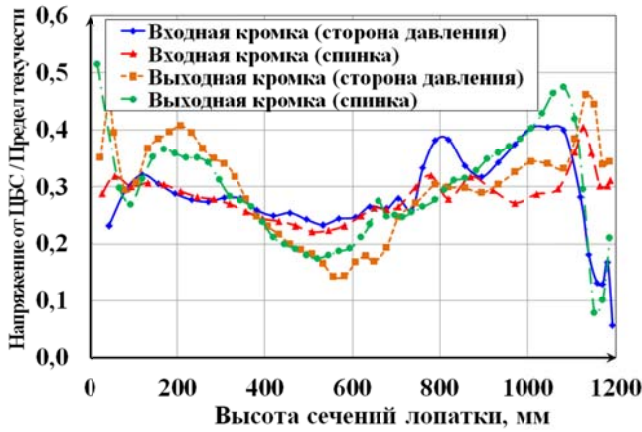
В новой конструкции число лопаток уменьшено с 92 до 70, а вместо двух демпферных связей применена одна. Для снижения уровня локальных напряжений отверстие под проволоку выполнено овальной формы. Благодаря использованным техническим решениям, в новой лопатке, по сравнению с исходной рабочей лопаткой, снижен уровень номинальных напряжений, а также локальных напряжений на входной и выходной кромках. В связи с повышенной жёсткостью, новая лопатка более устойчива к аэровозбуждению.

Расчеты, результаты исследований аэродинамической устойчивости и экспериментальная проверка вибрационной отстройки подтверждают выполнение критериев статической прочности и вибрационной надёжности новой лопатки.



а) Модель новой рабочей лопатки

б) Номинальные напряжения в сечениях по длине лопатки

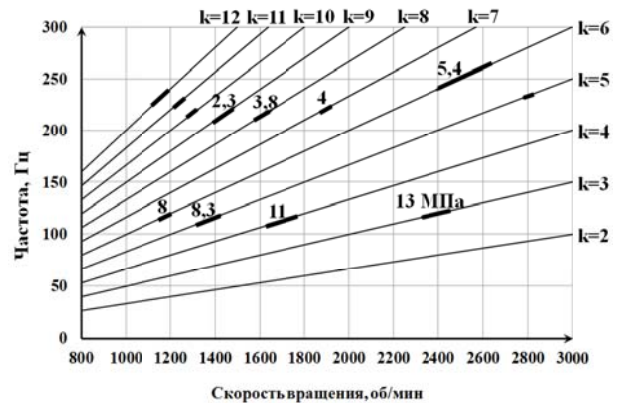
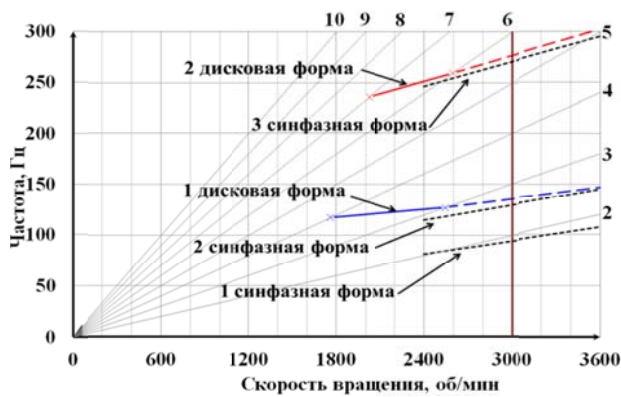


в)

г)

Напряжения на кромках лопатки от действия центробежной силы:

в) новая лопатка, г) исходная лопатка



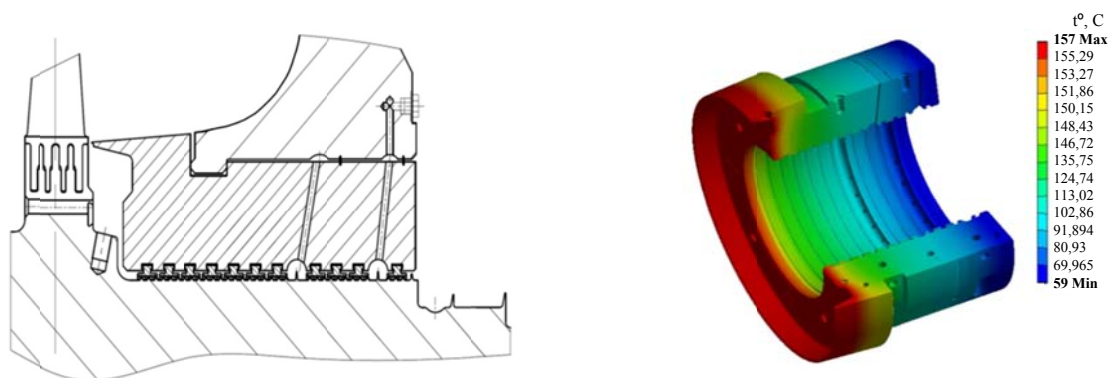
д)

е)

д) расчетная Кэмпбелл–диаграмма, е) данные испытаний

Рисунок 20 – Конструкция новой (усиленной) рабочей лопатки длиной 1200 мм и результаты исследований и испытаний

Разработана и внедрена новая **конструкция концевых уплотнений ЦВД втулочного типа** (рисунок 21).



Концевое уплотнение ЦВД

Распределение температур в уплотнении

Рисунок 21 - Конструкция и распределение температур в концевом уплотнении ЦВД втулочного типа паровой турбины К-1200-6,8/50

Расчет температурного состояния однообойменной конструкции концевое уплотнения ЦВД втулочного типа свидетельствует о равномерном распределении температур в осевом и радиальном направлениях обоймы уплотнения. Новая конструкция концевое уплотнения исключает её коробление во время эксплуатации, уменьшает износ уплотнительных колец и снижает протечки рабочего тела.

Разработана и изготовлена новая конструкция **блока клапанов низкого давления** с усовершенствованной проточной частью и сниженными потерями давления с 2,5% до 2,1%. Одновременно применение сферических подшипников качения в опорных узлах блока клапанов позволило снизить коэффициент трения в опорах с 0,3 до 0,05.

Новая тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50 для проекта «АЭС-2006» предусматривает повышение экономичности и имеет ряд усовершенствований, по сравнению с ранее применявшимися схемами. Главным из них является применение двухступенчатого промежуточного перегрева пара в СПП отбираемым из ЦВД паром и свежим паром. Это решение обеспечивает повышение экономичности турбоустановки примерно на 1%. Разработанные на основе расчетно-экспериментальных исследований конструкция быстроходной турбины, тепловая схема и вспомогательное оборудование позволяют отнести отечественную турбоустановку К-1200-6,8/50 для «АЭС-2006» к установкам мирового уровня и обеспечивают её высокую конкурентоспособность по сравнению с зарубежными аналогами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен комплекс расчётно-экспериментальных исследований по разработке, обоснованию и освоению в производстве и эксплуатации конструкции паровых турбин на 3000 об/мин большой мощности в диапазоне 995-1200 МВт для энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР, что позволяет отечественному атомному энергомашиностроению обеспечивать и сохранять позиции мирового лидера в быстроходной паротурбинной энерготехнологии АЭС.

2. Отмечена высокая роль атомной энергетики в современном и перспективном энергобалансе многих стран и актуальность развития конкурентоспособных отечественных быстроходных паровых турбин для энергоблоков АЭС на базе реакторов типа ВВЭР с давлением пара перед турбиной 6-9 МПа для решения задач обеспечения энергобезопасности страны и развития экспортного потенциала российского атомного машиностроения как важнейших стратегических задач страны.

3. На базе комплекса исследований аэродинамических, вибрационных и прочностных характеристик узлов турбин, разработаны высокоэффективные проточные части цилиндров паровых турбин с применением направляющих лопаток, выполненных с переменным тангенциальным навалом, усиленных титановых рабочих лопаток последней ступени длиной 1200 мм, оригинальных конструкций сотовых надбандажных уплотнений и втулочных концевых уплотнений ЦВД.

4. Результаты комплексных исследований кратковременной и усталостной прочности титанового сплава ВТ-6, разработки и внедрения метода ионной имплантации ионами азота для защиты лопаток от эрозии и фреттинг-износа, мониторинга вибрационного состояния рабочих лопаток последних ступеней с применением дискретно-фазового метода позволили создать новую усиленную конструкцию титановой рабочей лопатки последней ступени длиной 1200 мм, предназначенную для использования в перспективных быстроходных паровых турбинах большой мощности для АЭС.

5. Высокоэффективные конструкции входных и выходных патрубков цилиндров турбины и, в том числе с учетом проектных ограничений, обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований влияния конструктивных элементов на их аэродинамические характеристики.

6. Выполнены расчётно-экспериментальные исследования, разработаны, освоены в производстве и эксплуатации новые конструкции высокоэффективных регулирующих

клапанов греющего пара СПП и клапанов быстродействующей редуцирующей установки БРУ-К с повышенной виброустойчивостью.

7. Разработаны и освоены в производстве и эксплуатации быстроходные турбины мощностью 1060 МВт с четырьмя ЦНД для работы с глубоким и умеренным вакуумом за турбиной и выполнена оптимизация тепловых схем паротурбинных установок с достижением оптимальных компоновочных решений по турбоустановке (встроенный ПНД-1, уменьшенное число ступеней регенеративного подогрева, электроприводной питательный насос и др.), обеспечивающих существенное снижение затрат на сооружение машзала.

8. Результаты экспериментальных исследований и промышленного апробирования конструкции опорных подшипников для работы при высоком уровне удельных нагрузок (до 3 Мпа), с использованием гидродоёма сферы вкладыша подшипника, позволили сконструировать, изготовить и успешно внедрить быстроходную турбину мощностью 1014 МВт с малоопорным валопроводом.

9. Разработаны и освоены в производстве и эксплуатации быстроходные турбины мощностью 995-1014 МВт с тремя высоконагруженными по расходу пара ЦНД на условия работы с неглубоким вакуумом и с учетом проектных ограничений. Выполнена оптимизация тепловых схем паротурбинных установок с этими турбинами.

10. Разработана конструкция, освоена в производстве и находится в стадии монтажа быстроходная паровая турбина рекордной мощности 1200 МВт для АЭС, созданная в рамках проекта Росатома «АЭС-2006».

11. Комплекс конструкторско-технологических решений, полученных в данной работе на базе выполненных теоретических и экспериментальных исследований, прошёл успешное промышленное апробирование на быстроходных турбинах и ПТУ мощностью 1060 МВт с четырьмя ЦНД (АЭС «Тяньвань», Китай), на быстроходных турбинах и ПТУ мощностью 1014 и 995 МВт с тремя ЦНД (АЭС «Бушер», Иран и АЭС «Куданкулам», Индия) и применен при создании быстроходных турбин и ПТУ мощностью 1200 МВт (Нововоронежская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2).

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Лисянский, А.С. Паротурбостроение ЛМЗ в современных условиях / А.С.Лисянский, В.В. Назаров // Электрические станции. – 2000. – №12. – С. 69.
2. Лисянский А.С. Исследование и аэродинамическая отработка выхлопного патрубка турбины К-1000-60/3000 для АЭС «Бушер» / А.С.Лисянский, А.В. Никольский, В.К. Епифанов, Э.И. Гудков, Л.А. Фельдберг, В.Ф. Касилов -СПб.: Труды НПО ЦКТИ, 2002. -101с.
3. Петреня, Ю.К. Перспективы создания быстроходных паротурбинных установок мощностью 1500 МВт и выше / Ю.К. Петреня, Л.А. Хоменок, И.А. Ковалев, Ю.А. Качуринер, В.Н. Кондратьев, А.С. Лисянский // Труды ЦКТИ. – 2002. вып. 283. – С.12.
4. Филиппов, Г.А. Основные направления и перспективы создания турбоустановок для АЭС мощностью 1500-1700 МВт. / Г.А. Филиппов, О.И. Назаров, Ю.П. Томков, А.С. Лисянский // Сборник докладов научно-технической конференции ОАО ВТИ. – 2002.
5. Симою, Л.Л. Основные принципы формирования проточной части низкого давления паровых турбин / Л.Л. Симою, А.С. Лисянский, В.П. Лагун и др. - Энергетика за рубежом.- 2005. -№10. –С. 50.
6. Лисянский, А.С. Обеспечение стойкости к каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии лопаток паровых турбин за счёт вакуумного ионно-плазменного упрочнения поверхности / А.С. Лисянский. С.А Тихомиров, О.Н. Симин и др. // Энергомашиностроение. - 2005. -№2-3. –С.43.
7. Филиппов, Г.А. Направления совершенствования быстроходных паровых турбин АЭС / Г.А.Филиппов, А.С.Лисянский, О.И.Назаров, Ю.П.Томков // Энергетические машины и установки. – 2008. – №3. – С.3.
8. Скотникова, М.А. Исследование рабочих лопаток турбин большой мощности с учетом структурно-фазовых превращений в металле штамповок из титанового сплава ВТ6/ М.А.Скотникова, Т.А. Чижик, А.С. Лисянский др. // металлообраб.-2009.-№6.- С.28-33.
9. Никитин, В.И. Коррозионная стойкость нитридных покрытий лопаток паровых турбин / В.И. Никитин, А.М. Смыслов, А.С. Лисянский и др. //Теплоэнергетика. - 2009. - №2. –С.2.

10. Лисянский, А.С. Новые схемы и конструкторские решения по турбоустановке К-1000-60/3000 в проекте Тяньваньской АЭС / А.С.Лисянский, Л.Я. Бальва, Л.П. Заекин, Г.П. Грачева, Т.Н. Съестова // Тяжелое машиностроение. - 2004. -№8. –С. 15.

11. Лисянский, А.С. Обобщение результатов исследований по отработке конструкций опорных подшипников для мощных паровых турбин АЭС / А.С.Лисянский, Н.П. Егоров, М.И. Шкляр, Н.С. Лебедько, А. Ф. Спиридонов, Р. К. Ковальский, А. Е. Языков // Теплоэнергетика. - 2006. -№ 2. –С.2-8.

12. Лисянский, А.С. Отработка системы гидростатического подъема вала в подшипниках мощных паровых турбин / А.С.Лисянский, Н.П. Егоров, М.И. Шкляр, А.Ф. Спиридонов, В.Н. Егоров // Тяжелое машиностроение. - 2006. - № 7. –С. 2-5.

13. Лисянский, А.С. Создание малоопорной конструкции валопроводов мощных паровых турбин / А.С. Лисянский, М.И. Шкляр, Н.С. Лебедько и др. // Электрические станции.-2007.-№12.-С.52-58.

14. Лисянский, А.С. Основные результаты по отработке конструкций опорных подшипников мощных паровых турбин / А.С. Лисянский, Н.П. Егоров, М.И. Шкляр и др. // Тяж. машиностроение.-2008.-№4.-С.2-5.

15. Лисянский, А.С. Отработка и модернизация конструкций подшипников скольжения паровых турбин мощностью 200-1200 МВт. / А.С.Лисянский, Н.П. Егоров, М.И. Шкляр, В.В. Назаров, А.Е. Языков, И.А. Ковалев// Тяжелое машиностроение. - 2003. -№7.-С.12.

16. Лисянский, А.С. Совершенствование конструкций подшипников скольжения мощных паровых турбин / А.С.Лисянский, Н.П. Егоров, М.И. Шкляр, В.В. Назаров, А.Е. Языков, И.А. Ковалев // Электрические станции. - 2004. -№ 9.-С.28.

17. Жуков, Г.И. Энергетическая безопасность: современное состояние и перспективы развития энергомашиностроения / Г.И. Жуков, А.С. Лисянский, Е.А. Фадеев, В.И. Щелоков // Акад.энергетики.-2011.-№6.-С.22-27.

18. Гудков, Э.И. Сопоставление результатов расчетных и экспериментальных аэродинамических исследований выхлопных патрубков цилиндров низкого давления паровых турбин АЭС / Э.И.Гудков, В.Е. Михайлов, А.С. Лисянский, В.В. Назаров и др. // Теплоэнергетика. - 2012. -№3. – С. 18.

19. Филиппов, Г.А. Влияние влажности на экономичность паровых турбин / Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, А.С. Лисянский // Изв. РАН. Сер. Энергетика.-2012.-№6.-С.96-107

20. Филиппов, Г.А. Экспериментальное исследование влияния начальной влажности на распределение параметров эрозионно-опасной жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой/ Г.А. Филиппов, В. Г. Грибин, А.С. Лисянский и др. // Вестн. МЭИ.-2013.-№1.- С.55-61.

21. Лисянский, А.С. Лабиринтовое надбандажное уплотнение для паровой турбины / А.Ф. Ивах, М.П. Юшка, С.В. Ушинин, К.В. Горлицын// Патент РФ №232887 от 06.08.2008 г. Б.И. №21.- 2009.

22. Ушинин, С.В. Сотовое надбандажное уплотнение ступеней низкого давления паровой турбины / С.В. Ушинин, М.П. Юшка, А.С. Лисянский, К.В. Горлицын // Патент на полезную модель РФ №92471 от 25.11.2009 г. Б.И.№8.- 2010.

23. Лисянский, А.С. Опорный подшипник скольжения ротора турбоагрегата / А.С.Лисянский, Н.П.Егоров, Р.К.Ковальский, М.И.Шкляров и др. – Патент 2239107 Дата приоритета 16.09.2002г.

24. Лисянский, А.С. Вкладыш радиального подшипника скольжения / А.С.Лисянский, Н.П.Егоров, А.Ф.Спиридонов, М.И.Шкляров, В.В.Назаров, Р.К.Ковальский, А.А.Морозов – Патент на Пол. Мод. 22809 Дата приоритета 03.01.2002г.

25. Лисянский, А.С. Опорно-упорный подшипник / А.С.Лисянский, Ю.С.Сачков, А.С.Ласкин и др.– Патент 2241124 Дата приоритета:06.12.2002г.

26. Лисянский, А.С. Опорно-упорный подшипник / А.С.Лисянский, Ю.С.Сачков, А.С.Ласкин и др. – Патент 2248474 Дата приоритета:04.01.2003г.

27. Лисянский, А.С. Опорно-упорный подшипник скольжения вала турбомашин / А.С.Лисянский, Н.П.Егоров, А.Ф.Спиридонов, М.И.Шкляров, Е.М.Сухоруков, В.Н.Митин, Л.И.Чупрова, В.Н.Егоров – Патент 2282067 Дата приоритета 07.02.2005г.

28. Лисянский, А.С. Опорный подшипник скольжения вала турбомашин / А.С.Лисянский, Н.П.Егоров, М.И.Шкляров, В.Н.Митин, Е.М.Сухоруков, А.Ф.Спиридонов, Н.С.Лебедько – Патент 2237200 Дата приоритета 12.05.2003г.

29. Лисянский, А.С. Опорно-упорный подшипник / А.С.Лисянский, Ю.С.Сачков, В.Д.Гаев, А.С.Ласкин, Р.К.Ковальский, С.И.Шпилева – Патент 2241124 Дата приоритета:06.12.2002г.