

На правах рукописи

АДАМСОН Дмитрий Альбертович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАТРУБКОВ МОЩНЫХ
ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ
ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ**

Специальность 05.04.12 — Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

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

Научный руководитель: Кириллов Александр Иванович,
д.т.н., профессор, засл. деятель науки РФ..

Официальные оппоненты: Лапшин Кирилл Леонидович,
д.т.н., ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», профессор кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели»;
Гудков Эдуард Ильич,
к.т.н., ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург, с.н.с, зав.физико-техническим отделом.

Ведущая организация: ОАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «09» апреля 2013 г. 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, I уч. корп., ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_01_»__марта__2013 г.

Ученый секретарь

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



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние паротурбинного оборудования, работающего на электростанциях России, характеризуется значительным физическим и моральным износом. По данным РАО «ЕЭС России» изношенность достигает 60%, при этом основной парк составляют турбины, изготовленные в 60...70 гг. прошлого века, часть из которых можно сохранить в эксплуатации, подвергнув модернизации. Улучшить экономические показатели модернизируемого и вновь изготавливаемого паротурбинного оборудования можно, в частности, за счет снижения потерь кинетической энергии потока, выходящего из последней ступени. Для этого необходимо повысить качество проектирования выходного патрубка (ВП) паровой турбины, подкрепляя проектные решения результатами достоверных расчетов структуры пространственного течения в патрубке.

Коэффициент полных потерь ВП для мощных паровых турбин обычно составляет $\zeta_n = 1,1 \dots 1,5$. Потери на участке «последняя ступень – выход из ВП» могут достигать 45...60 кДж/кг. Для турбины К-300-240 ЛМЗ с длиной последней лопатки 960 мм, например, располагаемый перепад энтальпий на последнюю ступень равен 225...250 кДж/кг, потери в выходном патрубке – 45...60 кДж/кг, потери с выходной скоростью – 30...40 кДж/кг. Снижение коэффициента потерь на величину 0,2 дает экономию в 3,6...5,4% от мощности последней ступени ($\Delta N_{\Sigma} = 1,0 \dots 1,8$ МВт).

Цель и задачи работы. Цель работы – показать возможность создания высокоэффективных ВП паровых турбин, в том числе и в значительно стесненных габаритных размерах. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие конструкции ВП;
- провести ревизию существующих одномерных методов расчета на предмет их соответствия результатам опубликованных к настоящему времени исследований с целью уверенного проектирования исходного варианта ВП;
- выбрать и верифицировать наиболее подходящие для ВП структуру расчетной сетки и опции расчета трехмерного течения;
- разработать методику применения вариантных расчетов трехмерных течений в ВП с целью повышения эффективности исходного варианта;
- выполнить проектирование ВП с помощью предлагаемого метода.

Предметом исследования является способ проектирования ВП мощных паровых турбин. Разработанный в результате исследований способ позволяет уверенно проектировать ВП с проточной частью повышенной аэродинамической эффективности.

Метод исследования – расчетно-теоретический с применением, как одномерной методики аэродинамического расчета, так и с постановкой расчетов трехмерных турбулентных течений в ВП на базе пакета прикладных программ ANSYS CFX-11. Результаты расчетов тестированы путем сравнения с опубликованными данными натурных и лабораторных экспериментов.

Научная новизна работы:

– разработана обновленная по результатам анализа опубликованных экспериментальных данных методика одномерного проектного расчета исходного варианта ВП мощной паровой турбины;

– сформулированы рекомендации по выбору совокупности вычислительных опций, обеспечивающих приемлемую для инженерных целей точность расчета пространственной структуры течения и потерь в выходном патрубке;

– верифицирована методика проведения вариантных расчетов трехмерного турбулентного течения в патрубке, предназначенная для корректировки формы его проточной части с целью повышения аэродинамической эффективности.

Достоверность полученных результатов подтверждена их соответствием данным опубликованных опытов и результатам верификационных расчетов поставленных автором при выполнении работы.

Практическая ценность работы. Разработанная в диссертационной работе методика позволяет уверенно проектировать ВП мощных паровых турбин с меньшими, чем в традиционных конструкциях, потерями. Применение спроектированных по предложенной методике патрубков ведет к повышению мощности и КПД турбоустановки.

Результаты работы использованы в рабочем проекте ВП паровых турбин К-330-23,5-1 для Рефтинской ГРЭС и К-175/180-12,8 для Березовской ГРЭС. Предлагаемая методика была также успешно использована автором при проектировании ВП частей среднего давления турбины типа К-200 и турбины ТР-3,7-1,28/0,2П.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и положительно оценены: на VI международной научно-практической конференции «Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса» (г. Екатеринбург, 2009); на XIII международной научно-технической конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (г. Харьков, Украина, 2012); на секции ПТ, ГТ и ПГ установок НТС ОАО «НПО ЦКТИ» (г. СПб, 2012); на совместном заседании кафедр ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» «Турбинные двигатели и установки» и «Теоретические основы теплотехники» (г. СПб, 2012).

Личный вклад диссертанта состоит: в постановке задач исследования, в усовершенствовании одномерной методики проектного расчета для разработки исходного варианта ВП; в верификации трехмерного расчета ВП мощной паровой турбины по данным натурного эксперимента, в разработке последовательности выполнения расчетов трехмерного течения при проектировании ВП; в проектировании аэродинамически отработанных ВП цилиндров низкого давления (ЦНД) турбин К-330-23,5-1, К-175/180-12,8 и ВП цилиндров среднего давления (ЦСД) турбин типа К-200 и ТР-3,7-1,28/0,2П.

На защиту выносятся: одномерная методика проектирования исходного варианта ВП; верификация результатов численного моделирования трехмерного течения в проточной части ВП; методика отработки проточной части ВП по результатам численного моделирования в ней трехмерного течения; результаты практической реализации предложенной методики проектирования на примере проточной части ВП паровой турбины К-175/180-12,8 Березовской ГРЭС.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, списка обозначений, четырех глав, заключения и библиографического списка использованной литературы из 111 источников. Диссертация содержит 131 стр. текста, 48 иллюстраций и 5 таблиц.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «Гидроаэродинамика» СПбГПУ, а также профессору В.В.Рису и доценту С.А.Галаеву (кафедра «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ) за ценные консультации и помощь при выполнении трехмерных расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определяется основная цель исследований, их научная новизна и практическая значимость.

Результаты многолетних исследований ВП обобщены в работах отечественных и зарубежных ученых (Идельчик И.Е., Дорфман А.Ш., Сайковский М.И., Дейч М.Е., Зарянкин А.Е., Мигай В.К., Гудков Э.И., Касилов В.Ф., Дыскин Л.М., Kruckels J., Merz R., Mayer J.E., Stetter H., Zimmermann C. и др.). В 1977 г. Министерством энергетического машиностроения был введен руководящий технический материал РТМ 108.020.12-77. Этот документ рекомендован для эскизного проектирования ЦНД паровых турбин, как с подвальным, так и с боковым расположением конденсатора. В его разработке приняли участие ЦКТИ, МЭИ, ПО ЛМЗ и ПО ХТЗ. Многочисленные и весьма полезные для конструктора экспериментальные данные и их обобщения содержатся в ставших классическими монографиях «Газодинамика диффузоров и выходных патрубков турбомашин» (М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин) и «Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин» (В.К. Мигай, Э.И. Гудков).

Однако до настоящего времени не разработана методика проектирования выходного патрубка мощной паровой турбины, которая надежно обеспечивала бы высокую газодинамическую эффективность ВП. Немногочисленные и весьма дорогостоящие опыты на паровых турбинах, находящихся в эксплуатации (натурный эксперимент), дают коэффициенты потерь, как правило, значительно отличающиеся от значений, полученных в лабораторных условиях. Основная причина этого расхождения – взаимное влияние ЦНД и патрубка, корректно смоделировать которое на лабораторном стенде практически невозможно.

Вместе с тем прогресс в численном моделировании трехмерных течений вязкого газа позволяет не только подробно анализировать структуру трехмерного течения в патрубке, но и дает возможность учитывать взаимное влияние элементов проточной части турбины, не прибегая к сложным и дорогостоящим испытаниям. Вычислительный эксперимент, позволяет не только правильно осмыслить наблюдаемые физические эффекты, но и во многих случаях заменить лабораторный и натурный эксперименты более дешевым компьютерным моделированием, которое часто оказывается единственно доступным для конструктора средством оценки качества создаваемой конструкции.

Основная идея настоящей работы заключается в том, что проектирование ВП выполняется в два этапа.

На первом этапе формируется конструкция исходного варианта патрубка, который проектируется с использованием разработанной автором методики, основанной на основе одномерных аэродинамических оценок течения на участках патрубка. При этом делается допущение об однородности потока при входе на каждый участок. Поскольку исходный вариант – это лишь начальное приближение для уточняющих расчетов, к качеству его проектирования не следует предъявлять излишне высоких требований. Вместе с тем полезно уже на стадии разработки исходного варианта максимально использовать накопленный опыт проектирования ВП.

На втором этапе исходный вариант ВП корректируется по результатам серии вариантных расчетов трехмерного течения.

В главе 1 представлен обзор существующих конструкций ВП, указаны причины, вызывавшие те или иные изменения. Выделены основные показатели, позволяющие классифицировать ВП, и дан их анализ. Выделены общие для ВП характерные участки проточной части патрубка.

Материал по конструкциям изложен в аспекте исторического развития паротурбиностроения. Это позволило показать взаимосвязь изменений в конструкциях ВП с главной причиной таких изменений – ростом мощности турбины при повышении рабочих параметров пара. Являясь составной частью корпуса паровой турбины, ВП со временем был выделен в отдельную конструкцию. Дальнейшие изменения конструкции ВП были, в большей части, связаны с улучшением его газодинамических свойств.

В конструкциях мощных паровых турбин как отечественных, так и зарубежных существует несколько типов выходных патрубков. Несмотря на то, что в настоящее время отсутствует строгая классификация ВП, имеется ряд показателей, позволяющих разделить их на группы или типы. Выбор этих показателей основан на требованиях, продиктованных соображениями эффективности и надежности работы паровых турбин. В работе выделены три показателя, которые, по мнению автора, являются главными. По пространственному расположению места сброса отработанного пара позволяет разделить патрубки на осевой, боковой и подвальный. По месту расположения подшипниковой опоры патрубки могут быть разделены на патрубки с вынесенной и встроенной опорой. По сте-

пени загромождения проточной части можно выделить два типа конструкций: канальные и свободные патрубки.

В работе показано, что для каждого типа патрубка можно выделить четыре характерных участка: начальный участок, диффузор, сборная камера и переходной патрубков. Разделение ВП на характерные участки целесообразно для проектирования исходного варианта патрубка с помощью простых одномерных методов газодинамического расчета.

В главе 2 изложен метод проектирования исходного варианта ВП в рамках одномерной модели. Рассмотрены особенности течения на входе в ВП. По характерным участкам ВП анализируется распределение степени расширения, обсуждаются главные особенности течения в них.

Собран и обработан материал по большому количеству газодинамических исследований, выполненных различными авторами, как на модельных, так и на натуральных стендах. Материал классифицирован в соответствии с выделенными автором характерными участками. В пределах каждого участка рассмотрено влияние как геометрических, так и газодинамических параметров. Для геометрических параметров рассмотрен диапазон возможных значений, показаны их оптимальные значения и взаимосвязь с другими геометрическими параметрами. Для газодинамических параметров, кроме того, указаны пути к снижению неравномерности (окружной и радиальной).

Приведен пример проектирования исходного варианта ВП с радиально-осевым диффузором и подвальным расположением конденсатора для трехступенчатого ЦНД паровой турбины К-175-180-12,8 Березовской ГРЭС. Проектирование проведено в следующей последовательности: вначале распределена степень расширения по характерным участкам, а затем выполнено проектирование каждого участка в соответствии с выбранной степенью расширения.

В приведенном примере показано, что на существующий фундамент ЦНД паровой турбины К-160-130 ХТГЗ (прототип турбины К-175-180-12,8) можно по одномерной методике спроектировать ВП с прогнозируемым коэффициентом полных потерь $\zeta_n \approx 0,9$. Однако по результатам натуральных испытаний ВП паровой турбины К-160-130 ХТГЗ на режиме $\overline{GV}_2 = 0,842$ коэффициент полных потерь $\zeta_n = 1,95$. Столь высокий коэффициент потерь можно объяснить как заниженной (по сравнению с оптимальной) степенью расширения диффузора, так и неудачной локальной геометрией ВП.

В главе 3 обоснован выбор методики расчета, описаны результаты тестирования ВП с низким и с высоким коэффициентом потерь, определена последовательность проведения трехмерных расчетов. Показано, как проточную часть спроектированного по одномерной методике исходного ВП можно улучшить на основе вариантных расчетов трехмерного течения.

Большинство программных комплексов, таких как FLUENT, CFX, STAR-CD, FINE (NUMECA), CFD-ACE, содержат опции для реализации подходящего при расчете ВП метода моделирования RANS, т.е. для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с применением той или иной замыкающей модели турбулентности. В нашей работе вычисления выполнялись с помощью программного пакета ANSYS CFX-11.

При течении в ВП основная доля потерь, возникающих вследствие диссипации кинетической энергии, локализована в вихревых структурах, потери же в пограничном слое сравнительно невелики. Поэтому в качестве замыкающей модели турбулентности мы использовали высокорейнольдсовую версию k-ε модели. Тот факт, что при вычислении потерь в пограничном слое эта модель не предусматривает подробного разрешения поля осредненной скорости во внутренней области слоя, а использует пристеночные функции, не может заметно снизить точность расчета.

Дискретизация уравнений газовой динамики выполнена методом конечных объемов (МКО), основанным на интегральной формулировке законов сохранения массы, импульса и энергии. Этот метод пригоден как для структурированных, регулярных сеток, так и для неструктурированных сеток с произвольной формой ячеек, что позволяет сравнительно легко строить сетки в областях со сложной геометрией. В нашей работе во всей расчетной области строились неструктурированные сетки (~1...3 млн. ячеек), состоящие из тетраэдров на удалении от стенок и призм (~ 10 слоев) вблизи стенок.

При расчете течения в ВП важную роль играет способ задания граничных условий во входном сечении патрубка. В настоящей работе все верификационные и проектные расчеты ВП выполнены для режимов, близких к номинальному, когда окружная неравномерность параметров потока при входе в патрубок сравнительно невелика. Следует также иметь в виду, что обычно применяемые методы расчета проточной части турбины (одномерный расчет или расчет невязкого осесимметричного течения) не дают информации об окружной неравномерности параметров потока. Опытные данные, которые были использованы

для сравнения с результатами верификационных расчетов, также не содержали замеров, по которым можно было бы достоверно судить об окружной неоднородности потока во входном сечении патрубка. Поэтому в выполненных расчетах поля всех параметров на входе в патрубок принимались осесимметричными. При этом не вводилось никаких ограничений по радиальной неравномерности параметров.

Влияние окружной неоднородности течения, что особенно важно для анализа нерасчетных режимов работы турбины, можно учесть, решая сопряженную задачу, т.е. сращивая данные расчета на выходе из отсека, составленного из нескольких последних ступеней цилиндра, с данными расчета во входном сечении патрубка. Решение этой весьма актуальной задачи все больше привлекает в последнее время внимание исследователей, однако, оно выходит за рамки настоящей работы.

Для исключения влияния выходного граничного условия на неоднородность течения в патрубке проточная часть ВП была дополнена протяженным диффузорным каналом, на выходе из которого задавалось постоянное по сечению давление, обеспечивающее пропуск номинального расхода пара.

Для описания термодинамических свойств рабочего тела использовалась как модель эквивалентного идеального газа с молекулярной массой и газовой постоянной, рассчитанными для локальной области изменения параметров состояния насыщенного пара, так и опция пакета ANSYS CFX-11, позволяющая вести расчет и использованием табличных значений термодинамических свойств водяного пара. Расчет проводился без учета теплообмена с наружной поверхностью и внутренними элементами ВП.

Выбранный метод численного моделирования применительно к реальным условиям течения в ВП (при имеющей место в паровых турбинах неравномерности параметров течения во входном сечении патрубка) был протестирован для двух ВП с разным уровнем коэффициента потерь.

Тестирование ВП с низким коэффициентом потерь (по результатам испытаний, коэффициент полных потерь $\zeta_{\text{п}}$ на режимах, близких к номинальному, находился в диапазоне 1,3...1,4) было выполнено для ВП паровой турбины К-300-240 ЛМЗ Кармановской ГРЭС. Трехмерный расчет выявил развитую вихревую структуру потока ВП, в целом схожую с приведенной ранее во многих публикациях. Отметим достаточно хорошее соответствие распределения

удельных расходов в выходном сечении ВП, полученных в результате трехмерного расчета, с распределением, полученным при исследованиях на натурной турбине. Расхождение (относительное) экспериментальных и расчетных значений коэффициентов потерь $\zeta_{\text{п}}$ в патрубке не превышает 2%.

Тестирование расчета трехмерного течения для патрубка с высоким коэффициентом потерь (турбина К-160-130) был выполнен для экспериментально исследованных режимов $\overline{GV}_2 = 0.842, 0.732, 0.625$ и 0.514 . Рассчитанный коэффициент полных потерь $\zeta_{\text{п}}$ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (см.таблицу).

Таблица

Исследованный режим \overline{GV}_2	0,842	0,732	0,625	0,514
Расхождение в коэффициенте полных потерь $\Delta\zeta_{\text{п}}$ (относит.)	8,7%	5,1%	0,6%	4,8%

Были сопоставлены также рассчитанные и экспериментально замеренные поля относительного удельного расхода и безразмерного давления в выходном сечении патрубка для режима $\overline{GV}_2 = 0,842$. Установлено не только качественное, но и удовлетворительное количественное соответствие пространственного распределения указанных параметров.

Результаты верификационных расчетов подтверждают возможность применения численного моделирования трехмерных турбулентных течений при исследовании интегральных и локальных характеристик ВП паровых турбин. Они воспроизводят близкую к действительности картину течения и обнаруживают зоны повышенных потерь.

Сформулируем последовательность выполнения трехмерных расчетов при проектировании ВП. Согласно нашему опыту, трехмерные расчеты следует подразделять на первичный, серию корректировочных и поверочный.

Первичный расчет выполняется для исходного варианта ВП, дополненного основными ребрами и связями, положение, форма и количество которых не могут быть существенно изменены в дальнейшем. Основная цель расчета – показать объемное распределение газодинамических параметров в проточной части ВП и выявить взаимное влияние его участков. Необходимо также подтвердить правильность построения диффузора или скорректировать его форму. По результатам первичного расчета могут быть приняты достаточно радикальные решения. В нашей практике, при проектировании ВП турбины К-330-23,5-1

стала очевидной необходимость увеличения протяженности ВП за счет уменьшения количества ступеней в ЦНД (сокращении длины проточной части турбины).

Серию корректировочных расчетов проводят на модели, в которую последовательно добавляют все элементы ВП. Целью расчетов является коррекция размеров участков ВП и отработка наполнения патрубка (ребер, перегородок и связей), ориентируясь на распределение давлений или скоростей и соблюдая методические указания, изложенные в гл. 2.

При отработке проточной части ВП уточняют: расстояние от выходной кромки лопатки последней ступени до передней стенки ВП; высоту верхней половины поворотной камеры; форму выборки под подшипник; расположение и форму силовых ребер и связей в нижней половине ВП.

Реальное рабочее проектирование ВП – итерационный и продолжительный процесс. Поэтому на заключительной стадии проектирования, полезно выполнить поверочный расчет, который установит газодинамические свойства разработанного ВП.

Глава 4 содержит пример проектной отработки исходного варианта ВП согласно развитой в гл. 3 методике проведения серии трехмерных расчетов. Объект отработки – исходный вариант ВП турбины К-175-180-2,8 (см. гл. 2).

Для вариантов с упрощенной конструкцией патрубка расчеты выполнены на сетках с размерностью, близкой к 1 млн. узлов; для вариантов, включающих все перегородки и элементы жесткости – с числом узлов, близким к 1.6 млн. На входе в расчетную область заданы осесимметричные распределения осевой $c_{2z}(r)$, окружной $c_{2u}(r)$ и радиальной $c_{2r}(r)$ компонент скорости, а также распределения степени сухости $x_2(r)$ согласно данным, полученным в результате теплового расчета проточной части ЦНД. На выходе из расчетной области задано давление, при котором обеспечивается пропуск номинального расхода пара.

Потери механической энергии определены по перепаду энтальпии внутри патрубка $h_{вн} = c_p \Delta T_{п}$ ($\Delta T_{п}$ – изоэнтропийный перепад среднemasсовой температуры между входным и выходным сечениями патрубка) и по кинетической энергии в выходном сечении $h_{в.с} = c_{в.с}^2 / 2$ ($c_{в.с}^2 / 2$ – среднemasсовая кинетическая энергия в выходном сечении патрубка), отнесенным к входной среднemasсовой кинетической энергии $h_{с2} = c_2^2 / 2$. Соответственно этому определены коэффициент потерь с выходной скоростью $\zeta_{в.с} = h_{в.с} / h_{с2}$, коэффициент внутрен-

них потерь $\zeta_{\text{вн}} = h_{\text{вн}} / h_{c2}$ и коэффициент полных потерь $\zeta_{\text{п}} = \zeta_{\text{вн}} + \zeta_{\text{в.с}}$. В работе используется также локальный коэффициент потерь

$$\zeta = \left[(i_2 - i_{s_{\text{лок}}}) + h_{c_2} - \frac{c_{\text{лок}}^2}{2} \right] / h_{c_2},$$

где $c_{\text{лок}}$ – местная скорость и $i_{s_{\text{лок}}}$ – местная изоэнтروпийная энтальпия.

Рассмотрим результаты расчетов исходного и окончательного вариантов. Сечения, в которых анализируется структура течения, показаны на рисунке 1. Локальные коэффициенты потерь изображены на рисунке 2 и 3. Они рассчитаны как потери для диффузорного течения. Там, где поток ускоряется, локальный коэффициент потерь, естественно, становится отрицательным.

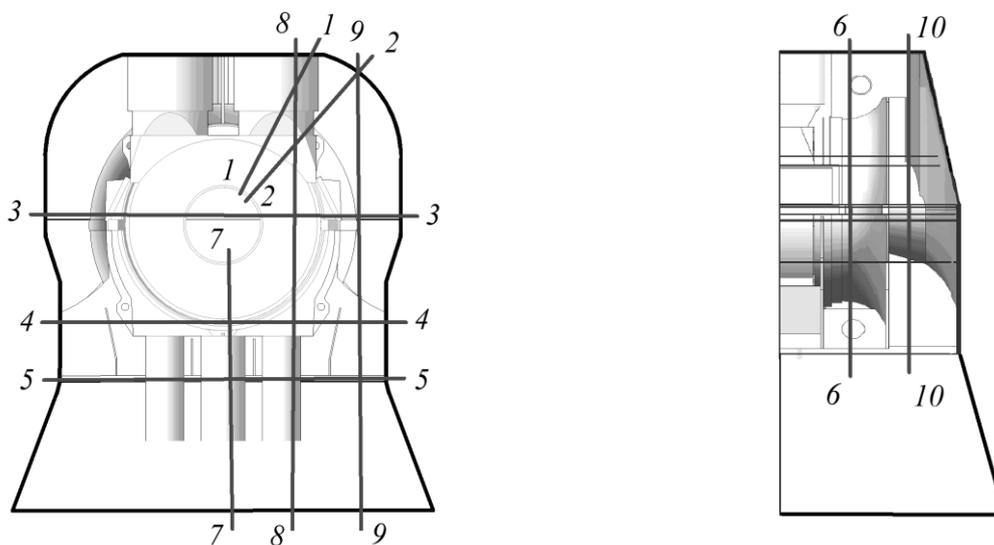


Рисунок 1. Положения сечений, где рассматривались поля параметров потока

Исходный вариант (рисунок 2). В сечении 1–1 локальные потери в диффузоре равномерно распределены по высоте, отрыв потока на внутренней поверхности отсутствует. Передняя стенка ВП не мешает выходу потока из диффузора, и, следовательно, осевая длина верхней половины ВП выбрана достаточной. Наблюдаемое в сечении 1–1 поджатое сверху вихревое течение, указывает на явно недостаточную высоту верхней половины ВП.

В сечении 2–2 размер вихревого потока увеличивается, а интенсивность локальных потерь падает. Ядро потока приобретает вытянутую форму, поджатую со стороны боковой наружной стенки ВП из-за недостаточной ширины верхней половины ВП. Следовательно, необходимо не только увеличить высоту патрубка, но и его ширину. Расположение ядра потока около передней стенки вызывает отрывное течение на наружной поверхности диффузора. Поток внут-

ри диффузора не содержит вихревых зон. На наружной и внутренней поверхности диффузора формируется пограничный слой, вследствие чего растут локальные потери.

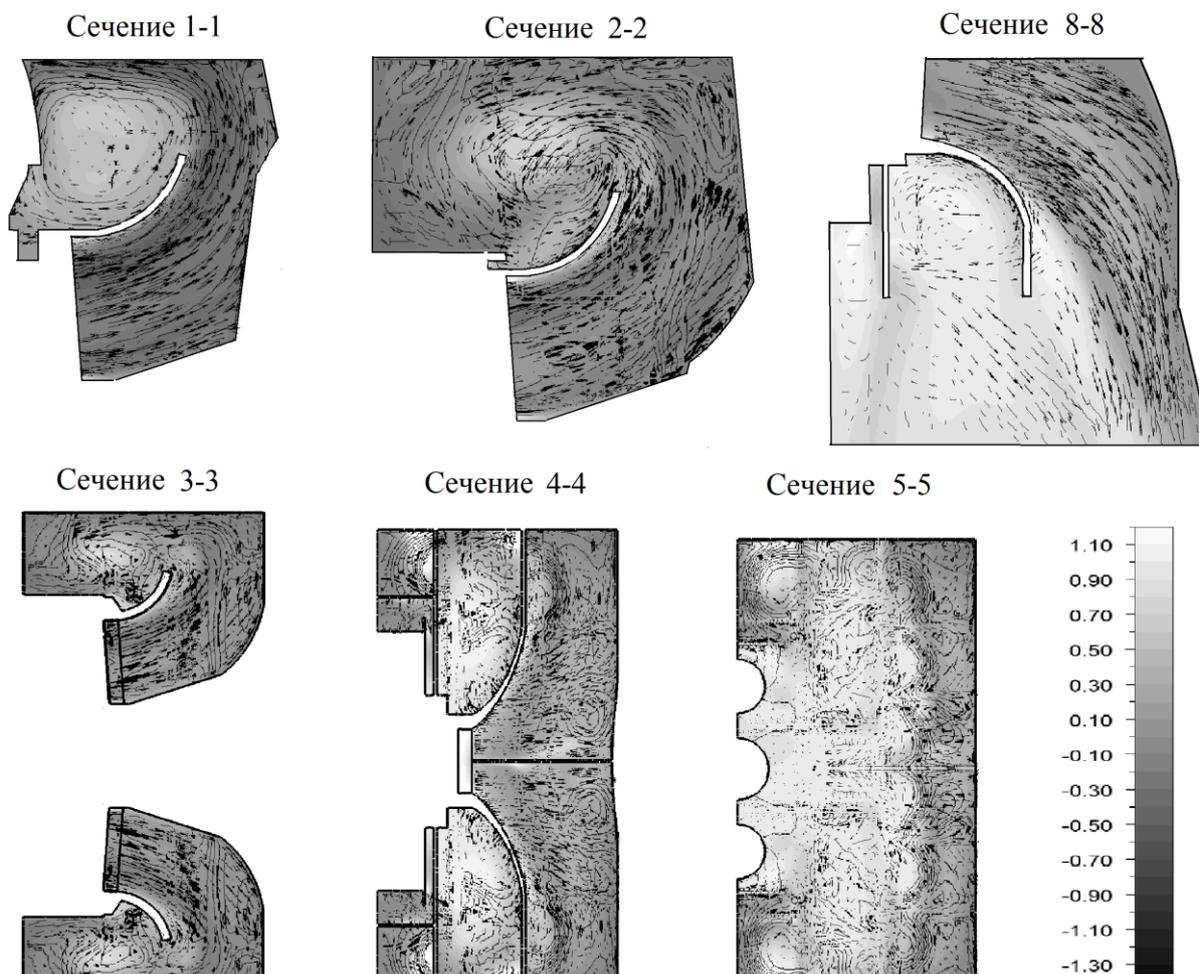


Рисунок 2. Векторы скорости и поля локальных потерь. Исходный вариант

Картина течения в сечении 3–3 похожа на картину течения в сечении 2–2. Однако вихревой поток более интенсивен, а отрыв в диффузоре смещен вверх по течению. Увеличиваются локальные потери на внутренней образующей диффузора. Общий уровень потерь увеличивается незначительно. Внутри диффузора течение достаточно равномерное, как и на предыдущих участках.

Поворотная камера спроектирована с недостаточной пропускной способностью. Хотя увеличить осевую длину и ширину поворотной камеры невозможно из-за габаритных ограничений, течение в ее верхней половине можно сделать более равномерным, для чего следует увеличить ее высоту и снизить радиус боковой поверхности. Это приведет к увеличению объема верхней половины и снизит потери.

В сечении 4–4 сформировавшийся боковой вихрь на наружной поверхности диффузора разрушается поперечными стенками, разделяющими ВП на шесть камер. Недостаточные габариты ВП приводят к увеличенным локальным потерям в задних и средних камерах. В передних камерах возникают застойные зоны. В сечении 4–4 отрыв от наружной образующей диффузора более интенсивен, чем в сечении 3-3.

В сечении 5–5, на выходе из ВП, происходит смешение потоков, вытекающих из ее верхней и нижней половин. Высокий уровень потерь наблюдается по всему сечению. В углах, граничащих с передней стенкой, возникают застойные зоны. От горизонтального разъема и ниже наблюдается развитое вихревое течение, улучшить которое можно, перераспределив поток, вытекающий из верхней и нижней половин диффузора за счет подбора положения продольных ребер. В целом трехмерный расчет исходного варианта показал удовлетворительное качество оценки общих габаритов ВП диффузора по одномерной методике. Вместе с тем расчет выявил участки течения с большими потерями, геометрию которых необходимо было корректировать.

Окончательный вариант (рисунок 3). Серия оптимизирующих патрубков трехмерных расчетов позволила выполнить коррекцию исходной геометрии ВП с учетом взаимного влияния участков патрубка. Затем ВП был заполнен внутренними элементами.

Наполнение ВП ребрами и связями было выполнено так, чтобы по возможности минимально нарушить благоприятную структуру течения, что следует из сравнения структуры потока в одноименных сечениях исходного и окончательного вариантов ВП. В результате коэффициент внутренних потерь $\zeta_{вн}$ несколько увечился, а коэффициент же потерь с выходной скоростью $\zeta_{в.с}$ практически не изменился. Окончательная конструкция ВП с ребрами и связями имеет коэффициент полных потерь $\zeta_{п} = 1,09$, что всего лишь на 0,11 больше, чем $\zeta_{п}$ ВП без ребер и связей.

Таким образом, в результате трехмерного расчета удалось в условиях жестких габаритных ограничений разработать конструкцию ВП с наполнением внутренними элементами, обладающую вполне приемлемым значением коэффициента полных потерь.

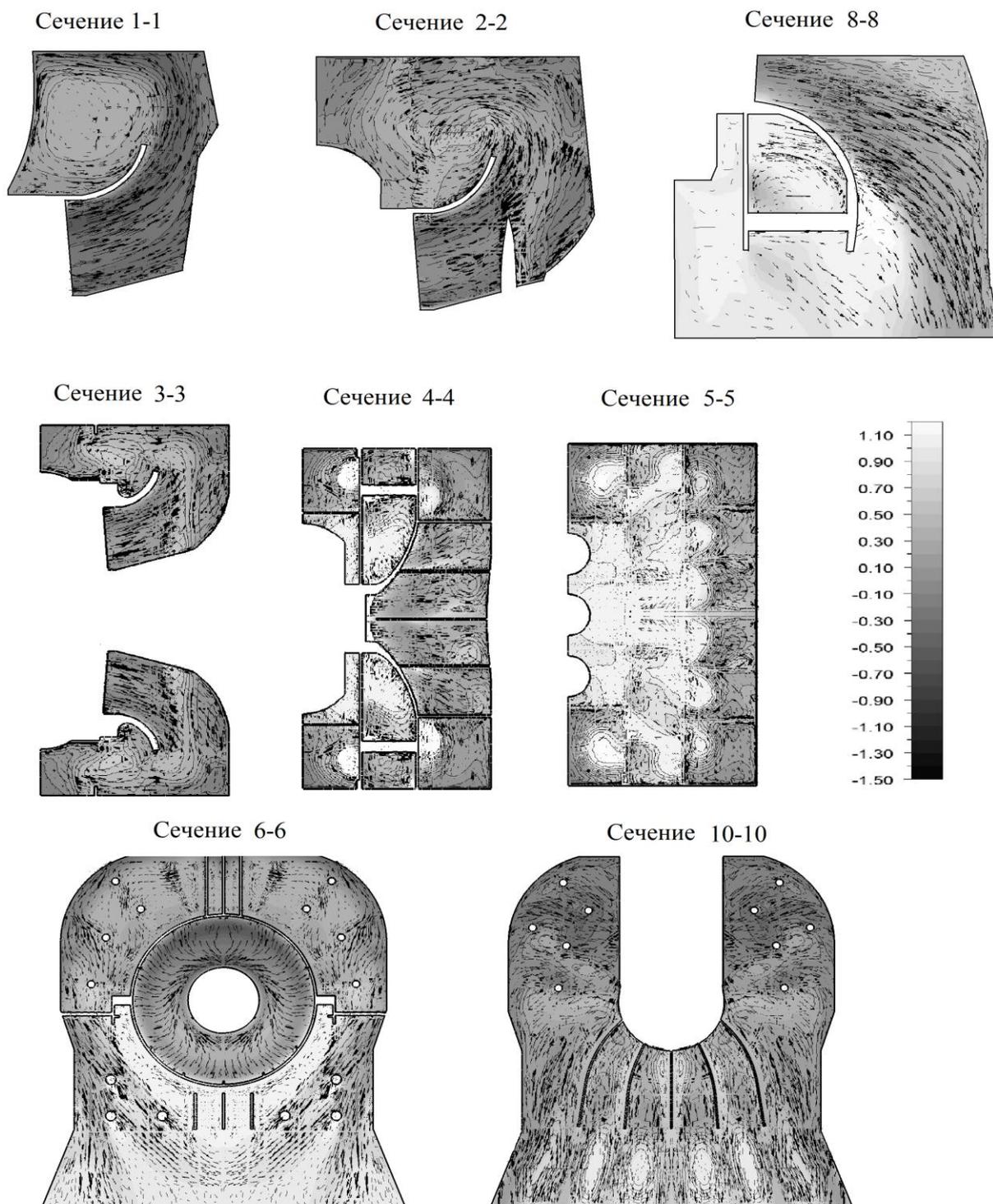


Рисунок 3. Векторы скорости и поля локальных потерь. Окончательный вариант.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика проектирования ВП в два этапа: на первом – патрубков проектируется поэлементно по одномерной методике, на втором – по результатам расчета трехмерного течения выполняется доводка его конструкции с учетом взаимного влияния элементов и реальной структуры потока во входном сечении патрубка.

Показана возможность проектирования эффективных ВП мощных паровых турбин по разработанной методике.

Решены следующие задачи.

1. На основе анализа существующих конструкций ВП отечественных и зарубежных паровых турбин показано, что проточную часть ВП, вне зависимости от его типа, можно рассматривать как последовательность характерных участков: начальный, диффузор, поворотная камера и переходной патрубок.

2. Проведена ревизия существующих одномерных методов расчета на предмет их соответствия результатам опубликованных к настоящему времени экспериментальных данных. Установлено, что одномерные методы расчета ВП, подробно изложенные как в отечественной, так и в зарубежной литературе, позволяют успешно проектировать элементы ВП. В результате выполненных автором обобщений сформулированы рекомендации по одномерному проектированию характерных участков ВП.

3. Показано, что ВП, составленный из спроектированных по одномерной методике участков, является хорошим исходным приближением для дальнейшей отработки его проточной части по результатам численного моделирования трехмерного течения.

4. Выполнено обоснование выбранной методики расчета трехмерного течения в ВП с использованием пакета прикладных программ ANSYS CFX-11 (выбран метод моделирования RANS с использованием k-ε модели турбулентности). Приведены результаты тестирования расчета трехмерного течения в ВП с низким коэффициентом потерь (турбина К-300-240) и с высоким значением коэффициента потерь (турбина К-160-130).

5. Показана целесообразность подразделения трехмерных расчетов на первичный, серию корректировочных и поверочный. Первичный расчет необходим для подтверждения корректности одномерного проектирования. В результате первичного расчета формируется трехмерная картина течения в патрубке, выявляются зоны течения с повышенными потерями. Корректировочные расчеты позволяют с учетом реальных условий течения во входном сечении тщательно отработать обводы ВП, а также форму и положение наполняющих его элементов. Поверочный расчет предназначен для определения газодинамических характеристик окончательной конструкции ВП.

6. С применением разработанной в диссертации методики автором выполнено рабочее проектирование новых ВП для двух принятых к производству

мощных паровых турбин К-330-23,5-1 и К-175/180-12,8. Паровая турбина К-175/180-12,8 имеет ВП с низким расчетным коэффициентом потерь $\zeta_{\text{п}} = 1,09$. Она предназначена для установки на Березовской ГРЭС взамен выработавшей ресурс паровой турбины К-160-130.

ПУБЛИКАЦИИ О ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах Перечня ВАК

1. Адамсон Д.А. Паровая турбина К-330-23,5 для замены выработавших ресурс турбин К-300-240 ХТГЗ/ Гудков Н.Н, Кириллов В.И, Бабиев А.Н., Адамсон Д.А. и др.// Теплоэнергетика, 2009, №4. — с.4-10.
2. Адамсон Д.А. Реконструкция ТЭЦ, оснащенных паровыми турбинами Р-50-130 ЛМЗ/ Ермолаев В.В., Гудков Н.Н., Шкляр А.И, Адамсон Д.А. и др.// Теплоэнергетика, 2009, №4. — с.18-22.

Статьи в научных изданиях

3. Адамсон Д.А. Аэродинамическое проектирование выходных патрубков турбины К-330-23,5-1/ Гудков Н.Н., Рис В.В., Галаев С.А., Адамсон Д.А. и др.// Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса: материалы Шестой международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.— с.72-79.
4. Адамсон Д.А. Особенности проектирования выхлопного патрубка паровой турбины К-175/180-12,8 ТЭС / Гудков Н.Н., Кириллов В.И., Кошелев С.А., Адамсон Д.А. и др.// Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса: материалы Шестой международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.— с.46-55.
5. Адамсон Д.А. Газодинамический расчет при проектировании выходных патрубков мощных паровых турбин // ХLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— с.60-61.
6. Адамсон Д.А. Проектирование выходных патрубков мощных паровых турбин на основе вариантных расчетов трехмерного течения / Адамсон Д.А., Галаев С.А., Кириллов А.И., Рис В.В. // Проб.машиностроения, 2012, Т.15, №3-4. — с.37-43.