

На правах рукописи



Миронова Марина Викторовна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА НА
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЯХ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ
МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кортиков Николай Николаевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Зейгарник Юрий Альбертович,
главный научный сотрудник отдела теплообмена
федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Объединенный институт
высоких температур РАН» («ОИВТ РАН»),
г. Москва

кандидат технических наук Кректунов Олег Петрович,
главный специалист научно-исследовательского
отдела обоснования безопасности ОАО
«Восточно-Европейский головной научно-
исследовательский и проектный институт
энергетических технологий»
(ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ»)),
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук (ИТ СО РАН),
г. Новосибирск

Защита состоится «23» сентября 2014 г. в «18» часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.06 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29, 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 темы исследования. Создание энергетического оборудования на сверхвысокие параметры пара сопровождается необходимостью введения принудительного охлаждения наиболее горячих и напряженных деталей проточных частей паровых турбин. Организация охлаждения наиболее горячих участков роторов высокого и среднего давления (РВД и РСД) позволяет продлить ресурс и повысить надежность работы паровой турбины.

Разработка систем охлаждения для получения равномерного распределения температуры и снижения термических напряжений требует совершенствования методов расчета теплового состояния элементов проточной части, в том числе отработки методов численного моделирования.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время расчет теплообмена между вращающейся поверхностью и потоком пара осуществляется на основе закона Ньютона-Рихмана с введением коэффициента теплоотдачи. Справедливость данного закона ограничивается случаем постоянства температуры стенки (или бесконечно большим значением теплопроводности). Более реалистичным является использование условий теплового сопряжения на границе (равенство температур и тепловых потоков) – условия четвертого рода. Это значительно усложняет задачу и требует совместного решения уравнений теплопереноса в газовой фазе и в твердом теле.

Важность сопряженного рассмотрения газодинамики и теплообмена показана в работах Лыкова А.В., Дорфмана А.Ш., Полякова А.Ф., Ревизникова Д.Л., Karvinen R., Rauvar P., описывающие особенности физико-математического моделирования сопряженного теплообмена в потоке вблизи пластины и в окрестности входной кромки лопатки. Существующая практика расчетов теплового состояния ротора и дисков (Селезнев К.П., Сафонов Л.П.) опирается на использование несопряженной осесимметричной постановки, справочных данных по гидравлическим сопротивлениям и критериальным зависимостям для расчета коэффициента теплоотдачи.

Объект исследования: одиночный вращающийся диск конечной толщины; полости с расходным течением газа, образованные двумя (неизотермическими) дисками; проточная часть цилиндра среднего давления (ЦСД) с системой принудительного парового охлаждения.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка рациональных подходов к моделированию трехмерного (3D) течения, теплообмена и теплового

состояния РСД с системой принудительного парового охлаждения (СППО). Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи.

1. Провести анализ характеристик сопряженного теплообмена на одиночном диске и в полости, образованной вращающимся и неподвижным дисками.

2. Разработать математическую модель сопряженного теплообмена при обтекании неизотермического вращающегося диска.

3. Предложить метод расчета теплового состояния вращающихся дисков применительно к условиям организации охлаждения паровых турбин.

4. Провести анализ различных подходов (осесимметричного и трехмерного) и разработать численную модель для моделирования трехмерного течения и теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины.

5. Показать возможности предложенных подходов на примере расчета теплового состояния охлаждаемой паром проточной части двухпоточного ЦСД, включающего диафрагменные уплотнения и диски первых ступеней.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

– Получено выражение для локального теплообмена для неизотермического вращающегося диска конечной толщины.

– Рассмотрены сопряженный (осесимметричный и трехмерный) и несопряженный осесимметричный подходы к моделированию теплового состояния РСД в условиях применения системы принудительного парового охлаждения и даны рекомендации по выбору параметров численных моделей.

– На основе уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу, и модуля STEAM (в качестве пользовательской функции UDF – user defined function), учитывающего свойства водяного пара при повышенных параметрах, разработана численная трехмерная модель расчета эффективности принудительного парового охлаждения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Предложена и апробирована трехмерная методика определения теплового состояния ротора паровой турбины с учетом сопряженности применительно к условиям принудительного парового охлаждения.
2. Разработанные численные модели на основе сопряженного подхода позволяют получать локальные характеристики теплообмена в системе зазоров между ротором и статором, а также трехмерное тепловое состояние ротора и дисков.
3. Показано, что корректное численное моделирование теплового состояния с помощью современного гидродинамического пакета не уступает по точности

определения их локальных и интегральных характеристик экспериментальным данным, позволяет дополнить, а в некоторых случаях заменить дорогостоящий эксперимент с целью получения распределения температуры в роторе и дисках с приемлемой для инженерной практики точностью.

4. Повышение точности расчетов и учет локальных характеристик теплообмена позволяет проектировать более гибкую систему охлаждения, обеспечивающую работоспособность турбины, а значит, увеличивать ресурс турбины.
5. Результаты работы применены в ОАО “Силовые машины” “ЛМЗ” при проектировании СППО паровых турбин.

Методология и метод исследования. Решение задач осуществлялось с использованием коммерческого пакета ANSYS Fluent, в котором применяется метод контрольных объемов для решения уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу; и с использованием функцией пользователя (UDF), учитывающей реальные свойства пара.

Положения, выносимые на защиту: математическая модель сопряженного теплообмена при обтекании неизотермического вращающегося диска в свободном пространстве, выражение для локального числа Нуссельта в случае неизотермического вращающегося диска конечной толщины в свободном пространстве с учетом параметра сопряжения, методика расчета сопряженного теплообмена на вращающихся дисках применительно к условиям организации охлаждения паровых турбин, результаты моделирования трехмерного течения и теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины.

Степень достоверности полученных результатов работы достигается использованием фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии; применением лицензионного программного обеспечения, верифицированного на основе сравнения с опытными и расчетными данными других авторов; согласованием расчетных данных с результатами тепловых испытаний СППО на станции.

Апробация работы. Основные материалы диссертации доложены и положительно оценены на XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (г. Санкт-Петербург, 2009), на Политехническом симпозиуме «Молодые ученые - промышленности Северо-Западного региона» (г. Санкт-Петербург, 2009), на 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2010), на 4-ом Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (г. Санкт-Петербург, 2010), на XVIII школе – семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (г.

Звенигород, Московская обл., 2011г.), на 6-ой Балтийской конференции по теплообмену - 6th Baltic Heat Transfer Conference (г. Тампере, Финляндия, 2011), научно-технических семинарах кафедр «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» и «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2014г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад диссертанта состоит: в постановке задач исследования, в разработке расчетных моделей и проведении расчетов гидравлики и теплового состояния, в анализе полученных экспериментальных и расчетных данных.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и списка использованной литературы из 94 наименований. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, имеет 8 таблиц и 59 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **главе 1** диссертации представлен анализ современного состояния и основных тенденций совершенствования паровых турбин, направленных на повышение начальной температуры пара, что предполагает предусматривать в конструкции турбин системы принудительного парового охлаждения (СППО) высокотемпературных зон.

На рисунке 1 представлена схема двухпоточного цилиндра среднего давления (ЦСД) паротурбинной установки в районе первых двух ступеней с проточными частями правого и левого потока, с применением СППО, разработанной ОАО «НПО ЦКТИ».

Охлаждающий пар, представляющий собой смесь пара холодного промперегрева (ХПП) и горячего промперегрева (ГПП), подводится в конструкцию через трубопровод (1), омывает ротор (2) и направляющее кольцо (3) центральной части ЦСД, а затем через зазоры между кольцом и первыми дисками рабочих ступеней возвращается в проточную часть турбины, охлаждая по ходу торцевые поверхности кольца и первых дисков. Дополнительно к диафрагмам вторых ступеней ЦСД подводится пар ХПП, который проходит через направляющие лопатки (4) и ряд отверстий, расположенных в теле диафрагмы (5).

Традиционно проектирование и доводка СППО выполнялись без применения современных методов газодинамических и тепловых расчетов. Это обуславливало повышенный объем испытаний, из-за чего увеличивались сроки и стоимость опытно-конструкторских работ. Одномерные математические модели теплового баланса,

изложенные в руководящих технических материалах (РТМ 108.020.16-83), не дают информации о локальных скоростях и температурах охлаждающего пара и температуры металла ротора, дисков и других элементов проточной части.

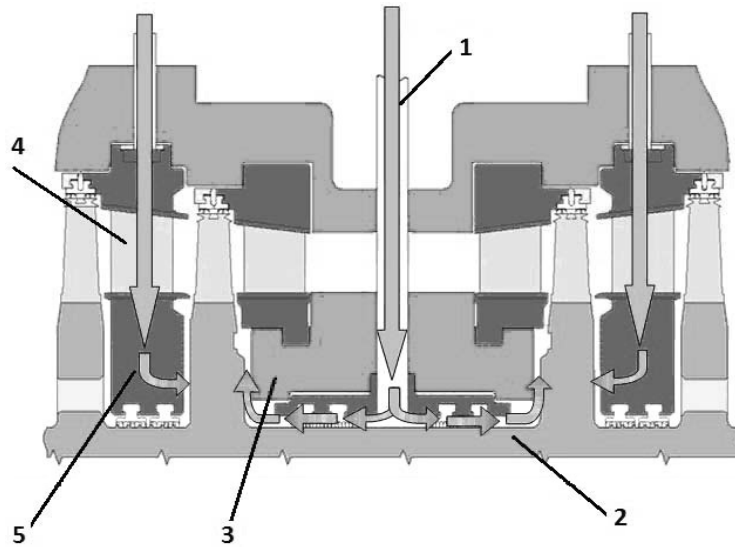


Рисунок 1 - Схема двухпоточного ЦСД с применением СППО:

- 1 – трубопровод подвода охлаждающего пара; 2- ротор; 3 – направляющее кольцо;
4 – направляющие лопатки; 5 – тело диафрагмы

В связи с развитием методов вычислительной газодинамики (Computer Fluid Dynamics - CFD) появилась возможность подробного моделирования физических процессов в формулировке краевых задач. Задание адекватных граничных условий (ГУ) при моделировании теплового состояния элементов проточной части мощных паровых турбин является нетривиальной задачей, от способа решения которой непосредственно зависит точность численного решения. Как правило, наиболее корректно задать термические ГУ удается в задачах в сопряженной постановке. Численные исследования в этом направлении (Емельянов В.Н., Волков К.Н.) подтвердили существенное влияние сопряженного рассмотрения задачи на интенсивность теплообмена при течении воздуха.

Таким образом, в известных исследованиях отсутствует обобщенный подход к численному моделированию теплового состояния элементов проточной части паровой турбины в условиях принудительного парового охлаждения, а вопросы обеспечения корректности и достоверности ГУ соответствующей краевой задачи до настоящего времени не рассматривались.

В главе 2 представлен вывод критерия сопряжения (число Брюна вращения) для вращающегося диска в неподвижном объеме газа, выполнен анализ характеристик сопряженного теплообмена на одиночном диске.

Необходимость в сопряженной постановке задачи для вращающегося диска определяется численным значением числа Брюна $Br_{\omega,r}$, который пропорционален

отношению тепловых сопротивлений теплопроводности стенки и локальной теплоотдачи в пограничном слое на диске.

Для решения задачи о вращающемся диске в покоящейся среде в сопряженной постановке (рисунок 2) необходимо применять граничные условия четвертого рода для поверхности сопряжения

$$-\lambda_s(\partial T/\partial y)_w = -\lambda_f(\partial \theta/\partial y)_w; \quad T_w = \theta_w \quad (1)$$

Здесь T - температура в потоке жидкости, θ - температура внутри твердого тела, λ_f , λ_s , - коэффициенты теплопроводности жидкости и диска соответственно.

Выражение (1), если используются конечно-разностная аппроксимация производных и характеристики пограничного слоя на вращающемся диске в покоящейся среде, переписывается в виде:

$$Br_{\omega,r} = (\lambda_f/\lambda_s) \cdot (b/r) Pr^m \cdot (Re_{\omega,r})^n \quad (2)$$

Значение числа Бюссингана вращения и характер его поведения вносят изменения в результаты решения задачи о локальном теплообмене на диске вследствие учета сопряженности. При ламинарном течении вокруг вращающегося диска ($n=1/2$) $Br_{\omega,r}$ не зависит от радиальной координаты r . Для турбулентного режима течения ($n=4/5$) число $Br_{\omega,r}$ возрастает к периферии диска пропорционально $r^{0,6}$. Полученное выражение для числа Бюссингана вращения показывает, что важность учета сопряженности возрастает при увеличении $Re_{\omega,r}$.

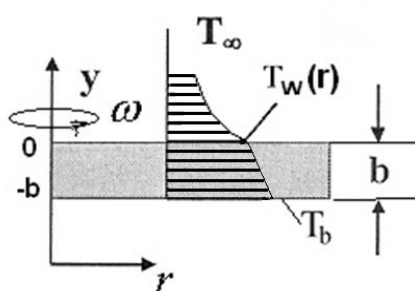
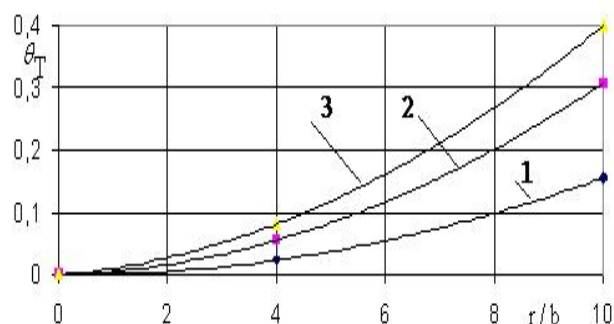


Рисунок 2 – Основные обозначения для задачи об одиночном диске



1 - $\omega = 104,7 \text{ c}^{-1}$; 2 - 314 c^{-1} ; 3 - $523,3 \text{ c}^{-1}$

Рисунок 3 - Изменение температуры поверхности вращающегося диска в зависимости от r и ω

На рисунке 3 представлено изменение безразмерной температуры поверхности вращающегося диска $\theta_T = (T_b - T_w)/(T_b - T_\infty)$ толщиной b в зависимости от радиуса r . При расчете принималось, что радиус диска равняется 200 мм, его толщина – 20 мм. Диск

изготовлен из нержавеющей стали и обтекается воздухом при турбулентном режиме течения. Получено, что $\theta_T = 0,304$ при $r/b = 10$ и частоте вращения 314 с^{-1} (3000 об/мин), что указывает на важность учета сопряженности в условиях турбулентного режима течения на дисках паровых турбин.

Для вращающихся неизотермических тел отсутствуют рекомендации, при выполнении которых возможен переход от сопряженной постановки (граничные условия четвертого рода) к классической (граничные условия третьего рода), а также важные для практических приложений критериальные выражения вида:

$$Nu_r = Nu_{r,0} f(Br_{\omega,r}), \quad (3)$$

где $Nu_{r,0}$ - число Нуссельта для изотермической поверхности диска.

С помощью метода А.В. Лыкова получено выражение локального числа Nu_r для неизотермического вращающегося диска конечной толщины в свободном пространстве с учетом параметра сопряжения. В этом случае аналитическое решение для локального теплообмена имеет вид:

$$Nu_r = 0,472 \cdot (Re_{\omega,r})^{1/2} Pr^{1/3} (1+z)^{-1/2} \quad (4)$$

Последний множитель в (4) указывает, что учет сопряженности приводит к снижению теплообмена на диске. Это связано с тем, что безразмерный температурный напор $(T_\infty - T_w)/(T_\infty - T_b) = 1/(1+z)$ уменьшается по величине при конечных значениях параметра сопряжения z (или θ_T). Аналогичное снижение коэффициента теплоотдачи отмечалось Дорфманом А.Ш. при ламинарном продольном обтекании пластины и падающем по ее длине температурном напоре.

В главе 2 проведены тестовые расчеты течения и теплообмена при охлаждении диска, вращающегося в ограниченном пространстве. Проверка адекватности результатов численного моделирования сопряженного теплообмена проводится на расчетной модели (рисунок 4) путем сравнения с экспериментальными данными (Yu J.P., Spangow E.M., Eckert E.R.G.).

В качестве модели турбулентности выбирается SST $k-\omega$ (модель Ментера). В проведенных расчетах модель турбулентности применялась с техникой расширенного пристенного моделирования ($y^+ \leq 1$). Получено удовлетворительное согласование локальных чисел Нуссельта с опытными данными (расхождение с опытом в сопряженной постановке не превышает 10%) (рисунок 5).

Для получения критериального выражения вида (3) был исследован диапазон $Br_{\omega,r} < 4$ для неизотермического диска, вращающегося в ограниченной полости. В

рассмотренном диапазоне чисел отношение локальных характеристик теплообмена $Nu_r/Nu_{r,0}$ обобщается в виде линейной функции и описывается уравнением:

$$Nu_r = Nu_{r,0} \cdot (1 + 0,0516 Br_{\omega,r})^{-1} \quad (5)$$

Выражение (5) указывает на важность внесения уточнений (в сторону занижения до 20%) в рекомендации по расчету теплового состояния дисков паровых турбин.

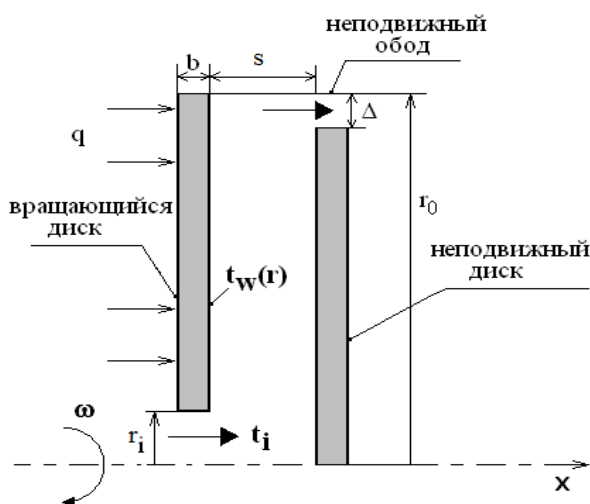
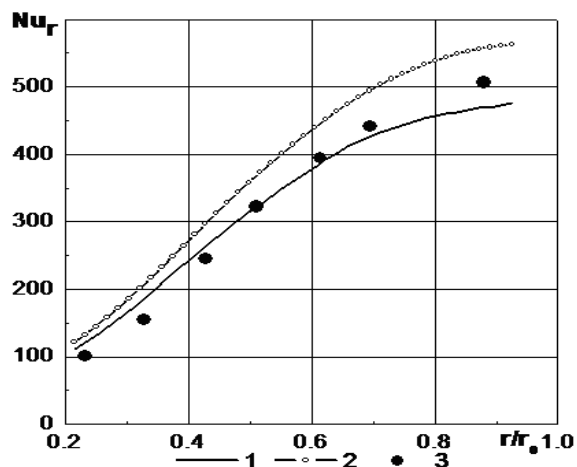


Рисунок 4 - Расчетная модель



1, 2 – расчет (сопряженная и несопряженная постановка), 3-опыт.

Рисунок 5 - Распределение Nu_r на поверхности вращающегося диска

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части (дисков и ротора) паровой турбины К-300-240 ЛМЗ в осесимметричной постановке. Для проверки адекватности результатов численного моделирования выполнено сопоставление с экспериментальными данными (Шаргородский В.С., Розенберг С.Ш., Хоменок Л.А., Шилин В.Л.).

Постановка задачи предполагает, что течение и теплообмен описывается системой стационарных уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу в осесимметричной постановке. Задача решается в сопряженной постановке, когда совместно решаются уравнения конвективного теплообмена для областей течения пара и теплопроводности для высокотемпературных твердотельных элементов проточной части. В качестве модели турбулентности выбирается SST k- ω . Свойства водяного пара моделируются с помощью разработанного модуля STEAM, который интегрирован в пакет ANSYS Fluent в качестве пользовательской функции UDF, учитывающей изменения плотности и теплофизические свойства пара в соответствии с рекомендациями Ривкина С.А. и Кремневской Е.А.

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами натуральных испытаний паровой турбины К-300-240 (рисунок 6). Максимальное относительное отклонение расчетных значений температуры от опытных данных не превышает 1,4 %.

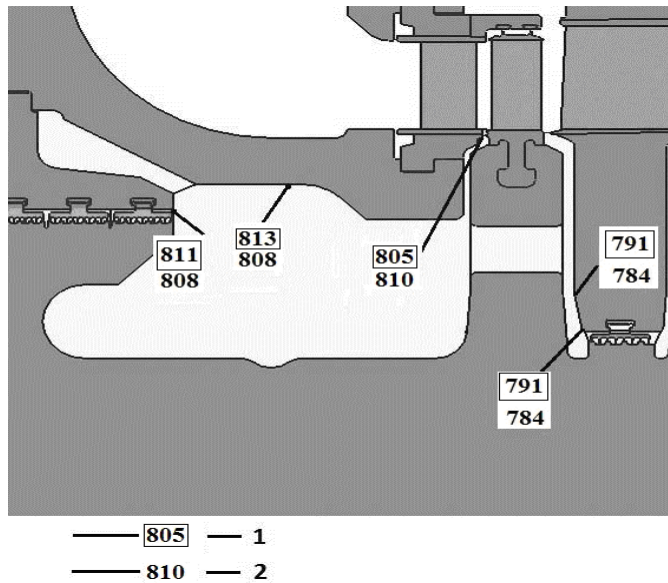


Рисунок 6 – Результаты сопоставления результатов расчета и натуральных данных, температура, К (Шаргородский В. С. и др.) (1 – эксперимент, 2 – расчет)

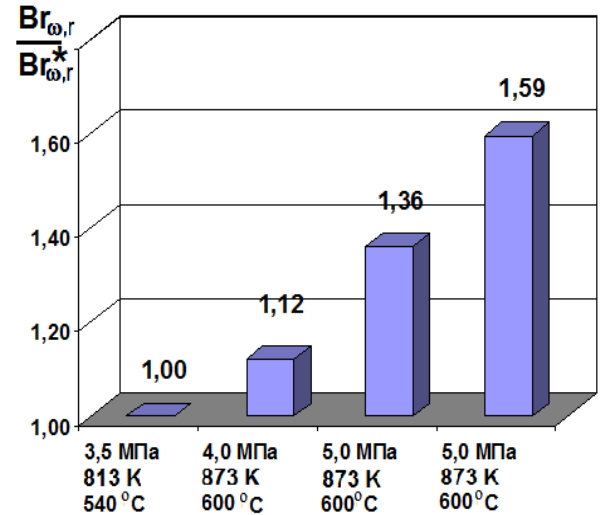


Рисунок 7 – Увеличение числа $Br_{\omega,r}$ в условиях перехода на повышенные параметры пара

Переход на сверхкритические параметры пара сопровождается введением принудительного охлаждения наиболее горячих и напряженных деталей проточных частей паровых турбин. Одним из примеров является паровая турбина К-660-247, рассчитанная на повышенные параметры пара.

Приведенные на рисунке 7 оценочные расчеты показывают увеличение значения числа $Br_{\omega,r}$ (до 59 %) в случае повышения начальных параметров пара в диапазоне 3,5 – 6,0 МПа и 813 – 873 К (540 – 600 °С). Значение числа $Br_{\omega,r}^*$ рассчитывается для параметров пара 3,5 МПа и 813 К (540°С).

Рассматриваются два варианта работы системы охлаждения (рисунок 1): в варианте № 1 подача охлаждающего пара осуществляется через трубопровод (1), в варианте № 2 для охлаждения дополнительно используются струи пара, поступающие через каналы, расположенные в теле диафрагмы второй ступени (5).

На рисунке 8 показана схема расположения участков, применяемых в расчетной модели. Расчетная сетка для паровой и твердотельных областей содержит 787637 ячеек. Сходимость итерационной процедуры достигается по прошествии 970 итерации для

режима без охлаждения; 1250 и 1540 итерации для первого и второго вариантов СППО соответственно.

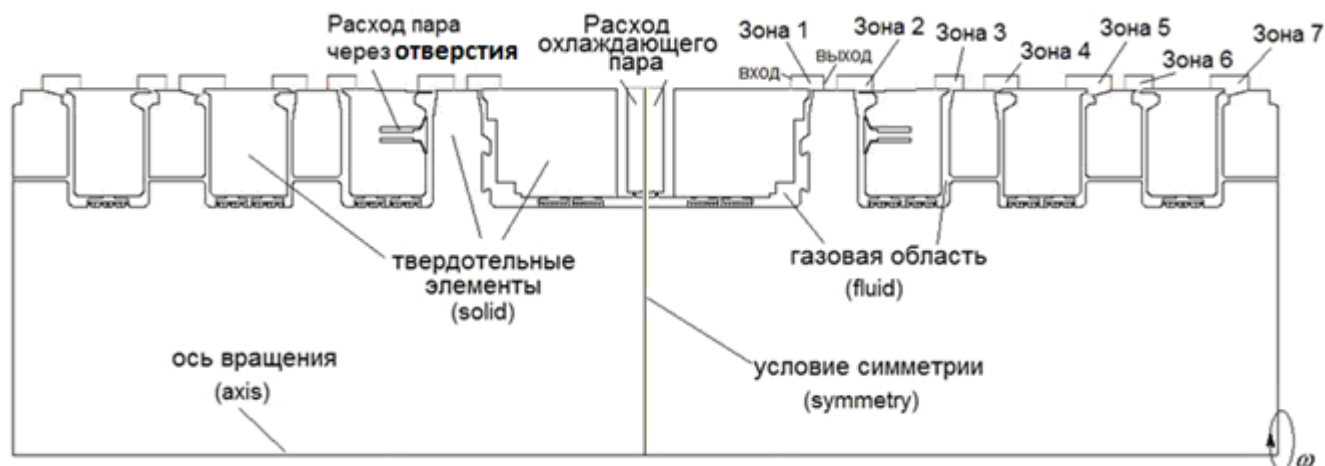


Рисунок 8 - Схема расчетной модели

Влияние основного потока пара на течение в зазорах (аналогично Moroz L., Tarasov A.) учитывается путем введения дополнительных зон ($s/h \geq 0,4$), в которых моделируется взаимодействие основного потока и вторичных течений пара в проточной части турбины (рисунок 9).

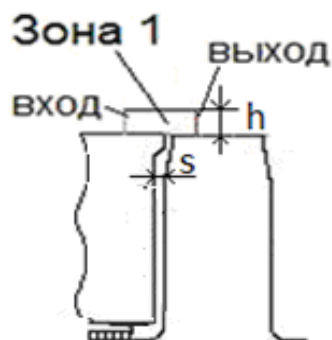


Рисунок 9 – Фрагмент расчетной модели

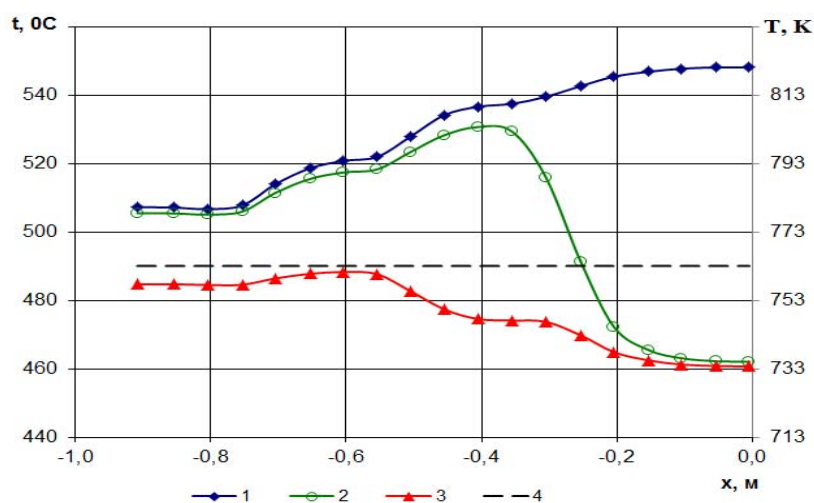


Рисунок 10 - Осевое распределение температуры поверхности ротора

(1 – режим без охлаждения; 2 – режим с охлаждением №1; 3- режим с охлаждением № 2, 4 – допустимая температура)

На рисунке 10 представлено осевое распределение температуры на поверхности ротора, где отмечается, что в случае применения первого варианта конструкции СППО имеет место локальное возрастание температуры до 803 К (530°C). Поверхность ротора турбины, диафрагменное уплотнение, диски первых двух ступеней ЦСД имеют температуру, превышающую предельно допустимую на 20 – 40 К.

Таким образом, первый вариант конструкции СППО не обеспечивает требуемый режим охлаждения, при котором наблюдалось бы снижение температуры высокотемпературных элементов проточной части СППО до значений, ниже 763 К (490°С).

Организация дискретного выдува охлаждающих струй при втором варианте СППО вызывает окружную неравномерность температуры защищаемой поверхности и, как следствие, предполагает введения трехмерного подхода в разрабатываемую модель с целью дальнейшего совершенствования конструкций СППО. Это становится еще более актуальным в связи с переходом на суперсверхкритические параметры пара с более высокими значениями температуры, когда возрастают требования к точности расчета температуры металла, влияющей на работоспособность конструкций.

В главе 4 представлены результаты расчета на основе трехмерного подхода по определению теплового состояния элементов проточной паровой турбины в районе первых двух ступеней для двух вариантов конструкций СППО.

Задачей данного исследования является определение влияния трехмерной геометрии (дискретности расположения разгрузочных отверстий, каналов для подвода охлаждающего пара) на окружную неравномерность при использовании сопряженной и несопряженной постановок задачи (рисунок 11).

В настоящей работе используются геометрические размеры элементов ротора и статора, а также зазоров между ротором и статором, которые вводятся из трехмерных электронных чертежей изделия. При этом предлагаемая методика расчета является составной частью CAD/CAE системы, что позволяет проводить информационную поддержку конструкторской разработки, как в процессе создания электронного чертежа с помощью SolidWorks или Unigraphics NX, так и при проведении газодинамических и тепловых расчетов.

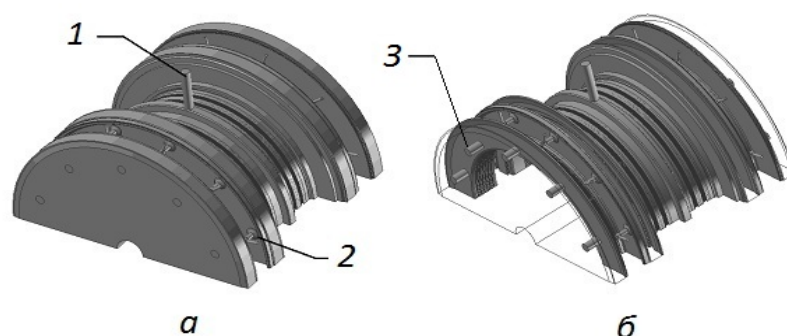


Рисунок 11 - Расчетная модель двухпоточного ЦСД для первых двух ступеней (а); проточная часть СППО (ротор не показан) (б); 1 - подводящий трубопровод, 2 – устройство для организации струйного обдува, 3 – разгрузочные отверстия

С целью экономии вычислительных ресурсов проточная часть СППО заменяется (не теряя общности в получаемых, в дальнейшем, результатах) трехмерной моделью в виде сектора, развернутого на 30° . В этом случае в расчетной области прописывается геометрия одного канала для организации струйного обдува и одного разгрузочного отверстия, а также сектора канала паровпуска (рисунки 12 и 13).

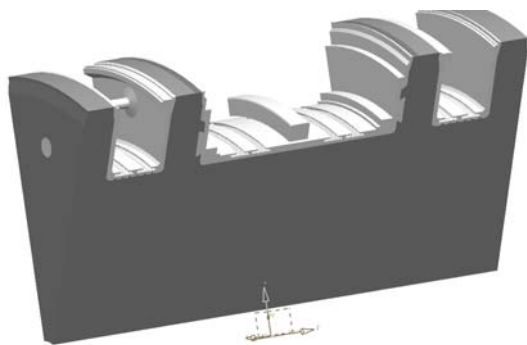


Рисунок 12 - Модель для расчета СППО («твердотельная» и «паровая» расчетные области)

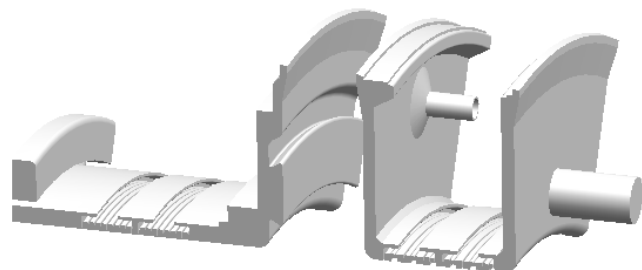


Рисунок 13 - Модель для расчета СППО («паровая» расчетная область)

В работе показано, что вследствие вращения ротора и дисков, закручиваемый поток пара в полостях СППО, способствует “размыванию” окружной неравномерности в распределении температуры металла дисков и ротора для обоих вариантов конструкции (с устройством для организации струйного обдува и без него). В случае второго варианта СППО (с применением струйного обдува) результаты трехмерного расчета показывают, что усложнение конструкции СППО за счет дискретного подвода струй пара через ряд отверстий приводит к искривлению в окружном направлении изотерм на поверхности диафрагмы второй ступени (рисунок 14).

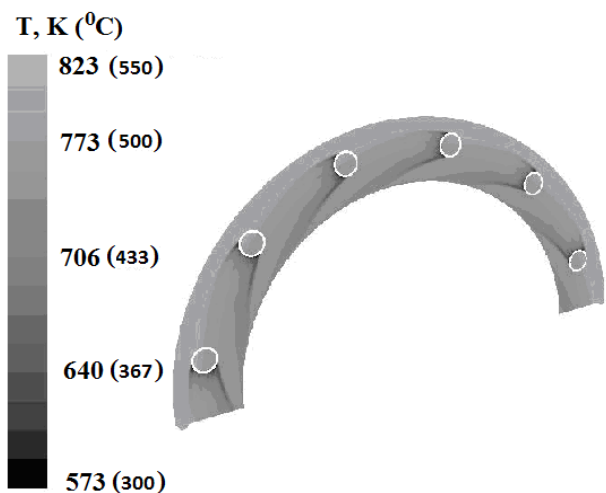


Рисунок 14 - Трехмерное поле температуры на поверхности диафрагмы 2-ой ступени

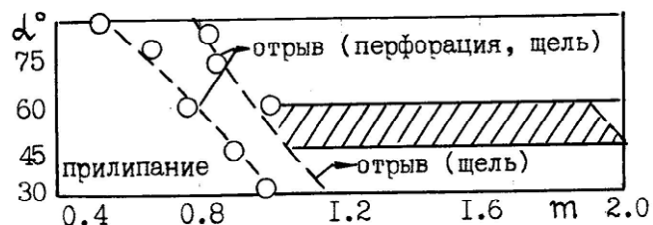


Рисунок 15 - Карта режимов (Смирнов Ю.А., Кортиков Н.Н.)

В рассматриваемой задаче с применением струйного охлаждения с параметром вдува $m = 0,12$ наблюдается эффект прилипания струи (рисунок 14), что соответствует карте режимов (рисунок 15). Выполненные расчеты демонстрируют наличие в проточной части СППО трехмерных эффектов. Таким образом, переход к осесимметричной модели в районе выхода пара из каналов, расположенных в диафрагме, представляется крайне проблематичным.

Сравнение результатов расчета, полученных при использовании различных подходов, показывает, что для первого варианта (без применения струйного обдува) разница подходов дает практически одинаковые значения температуры ротора (разница не превышает 4 – 5 К) (рисунок 16 а).

Добавление в конструкцию СППО дискретно расположенных струй вносит заметное различие в распределение температуры, рассчитанных по осесимметричному несопряженному подходу (РТМ 108.020.16-83), осесимметричной сопряженной и трехмерной модели (рисунок 16 б).

В главе 4 выполнено сопоставление результатов расчетов с данными испытаний системы охлаждения РСД. Анализ результатов работы СППО РСД на станции показал, что в период испытаний в систему охлаждения подавался охлаждающий пар с параметрами, отличными от проектных значений (691 К (418°C) вместо номинальной величины 733 К (460°C)), в связи с чем было выполнено моделирование данного режима работы СППО РСД.

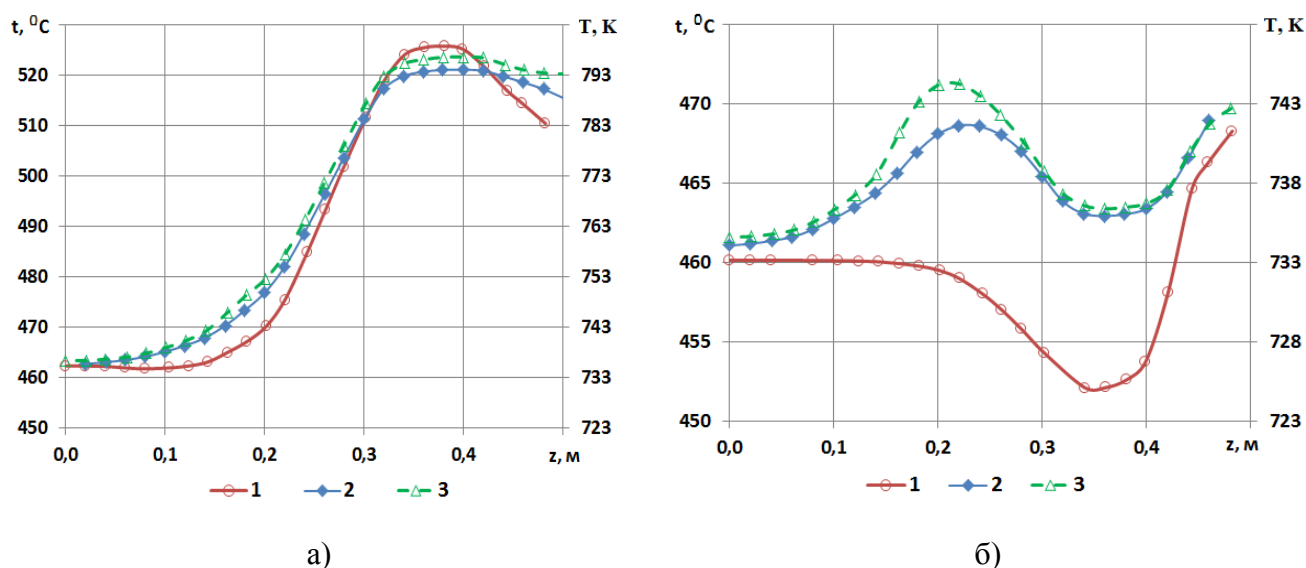


Рисунок 16 - Распределение температуры поверхности ротора по осевой координате:
 а) - варианта охлаждения № 1, б) - варианта охлаждения № 2
 (1 – осесимметричная несопряженная модель, 2 – осесимметричная сопряженная модель, 3 – трехмерная сопряженная модель)

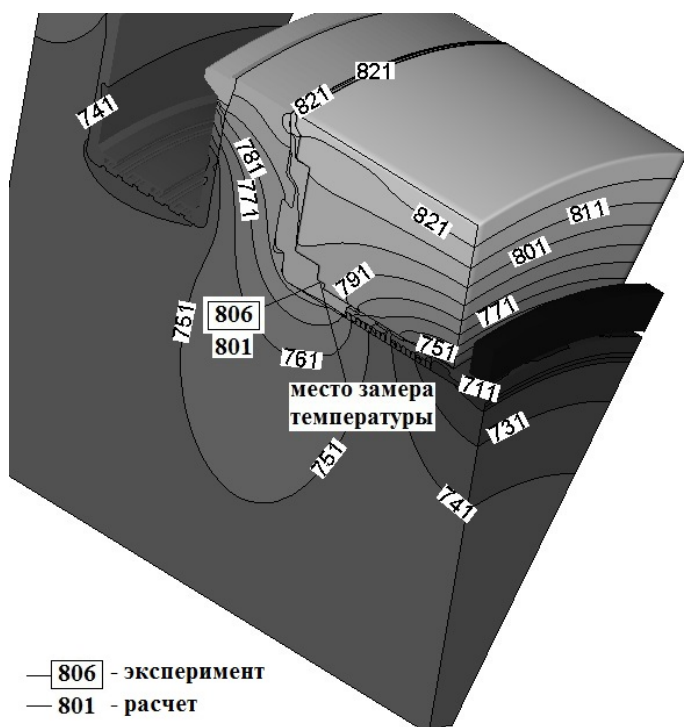


Рисунок 17 - Распределение температуры в районе первых ступеней, К

Результаты численного моделирования температурного поля в районе первых ступеней приведены на рисунке 17. Здесь можно отметить, что температура пара вблизи средней части ротора снижается только на 20 – 30 К. Это связано с наличием вторичных течений пара, обусловленных интенсивной закруткой потока от вращающегося ротора. Как следствие, при малых расходах охлаждающего пара, когда давление в камере охлаждения недостаточно для организации гарантированного одностороннего течения охладителя, ротор в средней части омывается смесью охлаждающего и процессного пара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны трехмерные и двумерные подходы к моделированию теплового состояния элементов проточной части мощных паровых турбин (К-300-240 и К-660-247) при наличии СППО на основе пакета ANSYS Fluent, в который интегрирован модуль STEAM (в качестве пользовательской функции UDF), учитывающий свойства водяного пара при повышенных параметрах. Даны рекомендации по выбору параметров численных моделей, обеспечивающие баланс точности с неопределенностью, не превышающей 1% по температуре металла.
2. На основе метода А.В. Лыкова показано, что учет сопряженности приводит к снижению теплообмена на поверхности вращающегося диска в случае ламинарного течения. При турбулентном течении в полости, образованной двумя дисками (один диск (неизотермический) вращается, другой – неподвижный) данное снижение составляет 20% при числе Брюна вращения $B_{r_{\omega,r}} < 4$.

3. Применение опции Axisymmetric swirl пакета ANSYS Fluent и сопряженного подхода для участка конструкции паровой турбины К-300-240, позволило получить удовлетворительное соответствие расчетных и опытных данных (отклонение не превышает 1%) по тепловому состоянию статора, ротора с дисками.
4. При расчете теплового состояния элементов проточной части паровой турбины К-660-247 отмечено, что разницей в подходах (трехмерный или осесимметричный) в случае подачи охладителя через центральный паровпуск можно пренебречь (разница в значении температуры металла ротора не превышает 0,8%).
5. Результаты трехмерного расчета для второго варианта СППО (с применением струйного обдува) показывают, что усложнение конструкции за счет дискретного подвода струй пара через ряд отверстий приводит к искривлению в окружном направлении изотерм на поверхности диафрагмы второй ступени вследствие прилипания струй к защищаемой поверхности при значении параметра вдува $m = 0,12$.
6. Анализ результатов работы СППО РСД показал, что снижение температуры пара вблизи средней части ротора только на 20 – 30 К связано с наличием вторичных течений пара, обусловленных интенсивной закруткой потока от вращающегося ротора.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах Перечня ВАК

1. Назаров, В.В. Расчет теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины: Анализ различных подходов / В.В. Назаров, Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9. – С. 24-29.
2. Кортиков, Н.Н. Сопряженный теплообмен на вращающемся неизотермическом диске / Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – № 4. – С. 597-603.
3. Кортиков, Н.Н. Трехмерное моделирование теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины / Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2011. – № 4 (135). – С. 215 - 220.

Статьи в научных изданиях

1. Кортиков, Н.Н. Методика расчета сопряженного теплообмена при обтекании неизотермических вращающихся тел / Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова // *Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы*. 18 мая 2009, Санкт-Петербург. – СПб: Издательство политехнического университета, 2009. – Т. 1. – С. 272.
2. Миронова, М.В. Численное моделирование процессов сопряженного теплообмена в проточных вращающихся полостях / М.В. Миронова, Н.Н. Кортиков // *Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: материалы конференций Политехнического симпозиума 22 мая 2009 г.* – СПб: Издательство политехнического университета, 2009. – С. 27-29..
3. Миронова, М.В. Сопряженный теплообмен на вращающемся диске. / М.В. Миронова, Н.Н. Кортиков // *Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25 – 29 октября 2010 г., Москва).* - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – т. 7. - С. 139 -141.
4. Миронова, М.В. Методика расчета теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины / М.В. Миронова // *Наука и инновации в технических университетах: материалы Четвертого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых (29 сентября – 2 октября 2010 г.)* – СПб: Издательство политехнического университета, 2010. – С. 143-145.
5. Кортиков, Н.Н. Сопряженный теплообмен охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины. / Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова // *Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях. Тезисы докладов XVIII школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. (23 - 27 мая 2011г.).* - М.: Издательский дом МЭИ, 2011. - С. 183-184.
6. Mironova M. Conjugated heat transfer on the rotating bodies: theory and application in turbomachinery / M. Mironova, N. Kortikov // *Proceedings of 6th Baltic Heat Transfer Conference. Tampere. Finland. August 24 - 26. 2011. ISBN 978 – 952 – 15 – 2638 - 1 (whole set). ISBN 978 – 952 -15- 2639-3 (printed), ISBN 978 – 952 – 15 - 2640-4 (CD-ROM).* 6 p.