

На правах рукописи

Банников Денис Викторович

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРОТУРБИН
И АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ В НИХ
МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Черный Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Белолипецкий Виктор Михайлович
доктор физико-математических наук,
профессор Федоров Александр Владимирович

Ведущая организация: Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Защита состоится 17 сентября 2010 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу 630090, Новосибирск, проспект Академика М.А. Лаврентьева, 6 (dsovet@ict.nsc.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН.

Автореферат разослан _____ августа 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Л.Б. Чубаров

Общая характеристика работы

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения задач проектирования новых перспективных конструкций гидротурбин, при котором необходим перебор огромного числа их возможных геометрий и анализа соответствующих этим формам гидродинамических течений.

Постоянно повышающиеся требования к коэффициенту полезного действия (КПД), кавитационным и прочностным характеристикам гидротурбины делают актуальным развитие и совершенствование методов автоматического оптимизационного проектирования форм проточных частей гидротурбин, позволяющих рассмотреть большое количество допустимых форм за короткое время и призванных стать наукоемким инструментом создания новых перспективных аэрогидродинамических установок. Также остается актуальной разработка новых экономичных подходов численного анализа энергетических характеристик гидротурбин.

Цель работы заключается в создании метода оптимизационного проектирования проточных частей гидротурбин на основе минимизации гидродинамических потерь энергии и выполнения прочностных требований и совершенствовании методик анализа течения в гидротурбинах.

Объектом исследований является геометрия проточной части гидротурбины и движение несжимаемой жидкости в ней.

Предметом исследований являются закономерности изменения гидродинамических характеристик турбины от вариации формы ее проточной части.

Метод исследования. Для решения прямых задач гидродинамики турбин используются современные методы математического моделирования и численные методы, а для решения задач оптимизационного проектирования – методы отыскания экстремальных значений функционалов.

Задачи, решенные в ходе достижения поставленной цели:

1. Создана экономичная комбинированная методика определения гидродинамических потерь энергии в гидротурбине на основе моделирования пространственных турбулентных течений и инженерных полуэмпирических подходов.

2. Разработан метод расчетного построения прогнозной универсальной характеристики для определения оптимального режима работы гидротурбины и характера зависимости КПД от режимных параметров.

3. Предложена и обоснована новая постановка задачи оптимизационного проектирования, учитывающая требования по запасу прочности и достижения заданной зависимости КПД от режима работы гидротурбины.

4. Разработан алгоритм и программный инструментарий для решения задачи оптимизационного проектирования на многопроцессорных вычислительных системах.

5. Построена параметризация формы рабочего колеса турбины, позволяющая более полно варьировать его геометрию для решения задачи выбора оптимальной формы.

6. Проведена верификация разработанных алгоритмов посредством сопоставления результатов численных расчетов с данными экспериментов и результатами, полученными другими авторами.

7. Решены практически важные задачи оптимизационного проектирования форм рабочих колес (РК) и анализа энергетических характеристик гидротурбин.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена оригинальная комбинированная методика расчета гидродинамических потерь во всей проточной части турбины, объединяющая экономичные инженерные полуэмпирические подходы с методами моделирования пространственных турбулентных течений.

2. На основе предложенной комбинированной методики создан новый метод расчетного построения прогнозной универсальной характеристики.

3. На основе вычислительных экспериментов и анализа зависимостей гидродинамических потерь выявлены основные закономерности формирования оптимального режима работы гидротурбины, определены индивидуальные свойства математических моделей и алгоритмов, указаны области их применимости в зависимости от характера изучаемых процессов и режимов работы.

4. Предложена и обоснована новая постановка задачи оптимизационного проектирования, включающая критерии по достижению заданной зависимости КПД турбины от режима ее работы и запаса прочности.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования ее результатов (методик, алгоритмов и их программной реализации, результатов расчетов) для определения зависимостей основных гидродинамических и энергетических параметров гидротурбин от её геометрии.

Разработанный метод оптимизационного проектирования может применяться для совершенствования и создания новых гидротурбин, выбора рациональной формы проточной части и режимов работы установки без проведения дорогостоящих экспериментов.

Результаты диссертационной работы используются в проектных исследованиях в филиале «Ленинградский металлический завод» концерна «Силовые машины».

Обоснованность и достоверность основных результатов, полученных в диссертации, основывается на строгом математическом описании используемых численных алгоритмов, детальных методических расчетах широко известных и рекомендуемых тестовых задач, сопоставлении результатов численных расчетов с данными экспериментов и результатами, полученными другими авторами.

На защиту выносятся

- методика расчета гидродинамических потерь энергии, позволяющая за короткое время получать оценки энергетических характеристик проточной части гидротурбины;
- метод расчетного построения прогнозной универсальной характеристики гидротурбины, позволяющий определять параметры оптимального режима и характер зависимости КПД от режимных параметров;
- новая постановка задачи многорежимного оптимизационного проектирования, заключающаяся в учете зависимостей энергетических и прочностных характеристик гидротурбины от режимов её работы;
- модификация генетического оптимизационного алгоритма для решения задач многорежимной оптимизации;
- параллельный алгоритм решения задачи оптимизационного проектирования на многопроцессорных системах;
- метод параметризации формы рабочего колеса турбины, позволяющий более гибко её варьировать при решении задачи выбора оптимальной геометрии;
- результаты решения ряда прикладных задач проектирования оптимальной формы рабочего колеса гидротурбины и анализа течения в ее проточном тракте.

Представление работы. Основные результаты диссертации докладывались на Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2006, 2007); Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2006); Международной конференции по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2007, 2008); Сибирской конференции по параллельным и высокопроизводительным вычислениям (Томск, 2007, 2009); Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Алма-ата, Казахстан, 2008); Международной конференции «HYDRO-2008» (Любляна, Словения, 2008); Всероссийской конференции «Математика в приложениях», приуроченная к 80-летию академика С.К. Годунова (Новосибирск, 2009); Международной конференции «Современные проблемы вычислительной математики и математической физики» посвященной памяти академика А.А.Самарского в связи с 90-летием со дня его рождения (Москва, 2009); Международной конференции «Вычислительная механика и современные прикладные программные системы» (Алушта, Украина, 2009); Летней школе для аспирантов «3rd Nordic EMW Summer School for PhD Students in Mathematics» (Turku, Finland, 2009); Международной молодёжной научной школе-конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2009); Международной конференции «Неравновесные процессы в соплах и струях (NPNJ'2010)» (Алушта, Украина, 2010); обсуждались на семинарах в Институте

Вычислительных технологий СО РАН, Институте гидродинамики СО РАН, Институте теплофизики СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем принадлежащий лично автору) 3 статьи в изданиях рекомендованных ВАК для представления основных результатов диссертации (3.4/1.6), 9 – в трудах международных и всероссийских конференций (3.7/2.2), 4 – в тезисах международных конференций (0.5/0.3).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-01-00146, 08-01-00364).

Личный вклад автора. В работах [1, 3, 6-8, 10-14], посвященных решению задач оптимизационного проектирования, автор принимал участие в постановках задач, построении численных алгоритмов и метода параметризации геометрии, интерпретации результатов. Результаты, изложенных в [1, 3, 6-8, 10-14], вычислительных экспериментов получены автором лично. В работе [1] автором предложено обобщение генетического оптимизационного алгоритма для решения многорежимной оптимизационной задачи, в [2, 5] проведена его всесторонняя верификация. В работах [8, 15] автором предложен и реализован параллельный оптимизационный алгоритм, а также проведена адаптация созданных ранее численных алгоритмов для работы на многопроцессорных системах.

В работах [3, 4, 6, 9, 13, 14], посвященных анализу течений в гидротурбинах, автор участвовал в разработке комбинированных методик расчета потерь энергии во всей проточной части гидротурбины и метода расчетного построения ее прогнозной универсальной характеристики, модификации численных алгоритмов. Проведение численных расчетов, анализ и сравнение полученных результатов с известными экспериментальными и расчетными данными выполнено автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 72 наименований, 8 таблиц и 103 рисунков. Общий объем диссертации составляет 151 страницы.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность С. Г. Черному за всестороннюю поддержку и постоянное внимание в ходе выполнения работы. Успешному выполнению работы способствовали ценные и критические замечания И.М. Пылева, А.А. Сотникова и Д.В. Чиркова. За помощь в работе автор выражает благодарность И.Ф. Ешкуновой и Д.В. Есипову.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения, указаны методы их решения и объекты исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость работы, определены основные положения, выносимые на защиту.

Приводится обзор работ, посвященных методам оптимизационного проектирования геометрии проточных частей (ПЧ) гидротурбин (ГТ), представленных в работах А.В. Бойко, Г.И. Топажа, С.Г. Черного, Y.Enomoto, F.Mazzouji, A. Ruprecht и др. Особое внимание уделено работам, в которых решаются многокритериальные задачи оптимизации. Обсуждаются достоинства и недостатки двух подходов к определению гидродинамических потерь энергии в проточном тракте: на основе непосредственного моделирования пространственного турбулентного течения и на основе инженерных полуэмпирических формул. Несмотря на более высокую разрешающую способность моделирования вязкого течения, отмечается сложность его применения для описания течений сразу во всем проточном тракте реальной гидродинамической установки из-за высоких требований к вычислительным ресурсам. Расчетное определение потерь во всей проточной части гидротурбины и построения ее универсальной характеристики на основе комбинирования экспериментальных данных и теоретических моделей представлены в работах А.В. Захарова, И.М. Пылева, Г.Ю. Степанова, Г.И. Топажа, И.Э. Этинберга, и др.

Приведенная информация даёт представление об имеющихся подходах к решению задач оптимизационного проектирования и к анализу течения в них.

В главе 1 описаны методики решения прямых задач гидродинамики турбин, определения их энергетических и прочностных характеристик.

В § 1.1 приведены трехмерные уравнений Эйлера (невязкая модель) и рейнольдсовы уравнения движения вязкой жидкости, замыкание которых проводится с помощью стандартной k - ε моделью турбулентности. Рассмотрена модель осредненного движения несжимаемой жидкости, которая получила широкое распространение при моделировании течения в густых лопастных решетках. Отмечаются достоинства и недостатки каждой модели. Описаны законы геометрического, кинематического и динамического подобия, выполнение которых необходимо обеспечивать при моделировании течений в гидротурбинах.

В § 1.2 даны определения основных характеристик гидротурбины, играющих важную роль при анализе течения в ней: КПД, напора, потерь энергии в каждом элементе и гидродинамического момента.

В § 1.3 описаны два подхода к определению гидродинамических потерь энергии. В первом подходе по известному полю турбулентного течения,

рассчитанному в каком-либо из элементов гидротурбины, потери энергии в нем $\Delta h_{\text{элемент}}$ определяются как

$$\Delta h_{\text{элемент}} = E_{\text{элемент}}^{\text{вх}} - E_{\text{элемент}}^{\text{вых}} - E_{\text{полезная, элемент}}, \quad (1)$$

где

$$E_{\text{элемент}} = \frac{1}{Q} \int_S \left(\frac{p}{\rho g} - z + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2g} \right) \mathbf{v} d\mathbf{S}, \quad (2)$$

$$E_{\text{полезная}} = \begin{cases} 0, & \text{для всех элементов кроме рабочего колеса,} \\ \frac{M\omega}{\rho g Q}, & \text{для рабочего колеса.} \end{cases}$$

Здесь E – удельная энергия жидкости в сечении S , p – гидростатическое давление, Q – расход, z – высотная отметка сечения, \mathbf{v} – вектор абсолютной скорости, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, M – гидродинамический момент, ω – угловая скорость вращения.

Во втором подходе оценка потерь энергии выполняется по инженерной полуэмпирической формуле¹

$$\Delta h_{\text{элемент}} = \zeta_{\text{элемент}}(\mathbf{L}, \mathbf{v}, \mathbf{c}) \frac{\overline{v_{\text{элемент}}^2}}{2g}, \quad (3)$$

где $\zeta_{\text{элемент}}$ – коэффициент потерь, определяемый геометрией \mathbf{L} , кинематикой потока \mathbf{v} и эмпирическими коэффициентами \mathbf{c} , $\overline{v_{\text{элемент}}}$ – осредненная по расходу характерная скорость потока в элементе. При расчете потерь в лопастных системах, включающих статорные колонны, направляющий аппарат (НА), рабочее колесо (РК), учитываются ударные, профильные и вторичные потери

$$\Delta h_{\text{ЛС}} = \Delta h_{\text{ЛС, ударн.}} + \Delta h_{\text{ЛС, проф.}} + \Delta h_{\text{ЛС, вторичн.}}. \quad (4)$$

При расчете потерь энергии в отсасывающей трубе суммарные потери в ней складываются из потерь на трение потока о стенки канала, циркуляционных потерь закрученного потока на выходе из РК и потерь от вихревого жгута.

Таким образом, гидродинамические потери во всей ПЧ ГТ можно найти очень быстро по инженерным полуэмпирическим формулам. Этот подход назван в диссертации расчетно-экспериментальным методом (РЭМ). Точность определения потерь по нему, особенно в НА и РК, будет невелика. Можно во всей ПЧ ГТ рассчитать турбулентное течение по рейнольдсовым уравнениям и найти потери энергии непосредственно по (1). Этот подход назван в диссертации расчетно-теоретическим методом (РТМ). Его точность высока, но он требует значительных затрат времени и не может быть использован для решения поставленных задач.

В связи с этим в работе предлагаются две комбинированные методики экономичного и в то же время достаточно точного определения

¹ Топаж Г.И. Расчет интегральных гидравлических показателей гидромашин. – Л.: Изд-во Ленинградского университета. – 1989. – 208 с.

гидродинамических потерь энергии во всей ПЧ ГТ. Суть этих методик заключается в применении для определения потерь энергии РТМ только в элементах ГТ, в которых РЭМ дает низкую точность. В первой методике это – НА и РК, и поэтому она обозначается аббревиатурой НА-РК. Во второй методике РТМ применяется в НА, РК и ОТ. Эта методика обозначается аббревиатурой НА-РК-ОТ. В остальных элементах потери оцениваются по РЭМ. Предложенные комбинированные методики определения потерь позволили построить в диссертационной работе метод оптимизационного проектирования по критерию непосредственной минимизации потерь энергии во всей ПЧ.

В §1.4 рассмотрены постановки задачи численного моделирования течений в турбомашине: циклическая, в приближении замороженного колеса и полная нестационарная постановка задачи. Рассмотрены используемые в большинстве работ² условия на входной и выходной границах области ПЧ, течение в которой рассчитывается. Они заключаются в задании распределений вектора скорости во входном сечении и давления в выходном сечении при решении уравнений Эйлера или давления и касательной составляющей скорости для уравнений Рейнольдса. Отмечается, что такая постановка фактически соответствует заданию расхода Q и не гарантирует сохранения напора в рассчитываемой области течения ПЧ. Для построения в диссертации модифицированного численного метода, который мог бы быть применен для расчета течения с неизвестным расходом жидкости, но гарантирующим сохранение заданного напора, предложена альтернативная постановка входных и выходных условий на границах расчетной области. Она заключается в задании в этих сечениях полных энергий. В выходном сечении кроме этого определяется характер относительного изменения давления, например, – условие радиального равновесия. Данная модификация численного метода позволила разработать в диссертации новый алгоритм расчетного построения важного инструмента анализа свойств ГТ – универсальной характеристики (УХ).

В §1.5 приводится используемый в диссертации метод решения уравнений Эйлера и Рейнольдса, основанный на концепции искусственной сжимаемости, неявной конечно-объемной аппроксимации и приближенной LU-факторизации линеаризованной системы разностных уравнений. Метод искусственной сжимаемости заключается в добавлении в уравнения неразрывности и импульсов производной по псевдовремени τ от давления и компонент скорости. Модифицированные уравнения записываются в форме интегральных законов сохранения и дискретизируются с использованием схемы Чакраварти-Ошера³. Дискретные нелинейные уравнения линеаризуются по методу Ньютона

² Чёрный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н. и др. Численное моделирование течений в турбомашине. – Новосибирск: Наука. – 2006. – 202 с.

³ Chakravarthy S.R., Osher S. A new class of high accuracy TVD schemes for hyperbolic conservation laws // AIAA Paper. – 85-0363. – 1985.

и полученная система линейных уравнений обращается с использованием приближенной LU-факторизации.

В §1.6 дается определение универсальной характеристики ГТ – одного из основных инструментов анализа энергетических характеристик ПЧ. Приводятся эмпирические формулы для расчета объёмных и механических потерь, которые необходимо учитывать в методе построения УХ. Строится алгоритм расчетного построения УХ на основе предложенных в диссертации комбинированных методик определения гидродинамических потерь энергии и модифицированного численного метода описания течения в области ПЧ.

В §1.7 поставлены полная и упрощенная задачи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) лопасти РК, находящейся под действием гидродинамических, гравитационных и центробежных сил. Уравнения линейной теории упругости с помощью метода граничных элементов⁴ приводятся к граничному интегральному уравнению для смещений, которое дискретизируется треугольными изопараметрическими линейными элементами. Полученная линейная система решается методом минимальных обобщенных невязок (GMRES). В результате решения задачи, определяется НДС лопасти и значения эквивалентных напряжений $\sigma_{эkv}$. Минимизация максимального значения $\sigma_{эkv}$ будет использоваться как один из критериев многорежимного и многокритериального метода оптимизационного проектирования ГТ, предлагаемого в диссертации.

Глава 2 посвящена анализу известных методов и построения нового метода решения обратных задач гидродинамики турбин, которые заключаются в проектировании геометрии ПЧ, удовлетворяющей требуемым критериям на заданных режимах работы ГТ. Методы решения задач проектирования разделяются на два класса: прямого и оптимизационного проектирования. В настоящей работе строится метод оптимизационного проектирования, но для полноты изложения в §2.1 описана суть методов прямого проектирования, развиваемых в работах А.В. Бойко, Г.В. Викторова, Г.И. Топажа², Т. Dang, J. Lighthill и др. Отмечены их достоинства и недостатки по сравнению с методами оптимизационного проектирования.

В §2.2 предлагается схема решения задачи многорежимной оптимизации на основе генетического оптимизационного алгоритма⁵ (рис. 1). Решение задачи выбора оптимальной формы основано на последовательности расчетов течений в большом количестве вариаций геометрии и выборе формы, обеспечивающей минимум одного или нескольких заданных целевых функционалов.

В §2.3 сформулирована математическая постановка задачи оптимизации:
найти

$$\min F_1(\mathbf{x}), \dots, \min F_M(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in \mathbf{X} \quad (5)$$

⁴ Aliabadi M. H. The Boundary Element Method. Vol. 2. Applications in Solids and Structures. – New Jersey: Wiley. – 2002. – 580 p.

⁵ Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: MIT Press, 1975.

при ограничениях

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}: x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}\}, \quad (6)$$

$$\psi_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad (7)$$

$$\varphi_j^l(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, J_l, \quad l = 1, \dots, L. \quad (8)$$

Здесь \mathbf{x} – вектор параметров, определяющих геометрию рабочего колеса, F_i – целевые функционалы, (6) – фазовые, (7) – геометрические, (8) – гидродинамические ограничения на каждом из L режимов работы ГТ.



Рис. 1. Схема процесса оптимизации.

В §2.4 предлагается и обосновывается метод параметризации формы РК, позволяющий гибко варьировать его геометрию. Количество параметров выбрано таким, чтобы оно обеспечивало максимальную полноту множества допустимых форм и в то же время позволяло достаточно быстро отыскивать минимумы функционалов на варьируемых по этим параметрам формах. Угловая координата лопасти параметризуется бикубическим полиномом с 16-ю свободными параметрами. Формы обода, ступицы, входной и выходной кромок лопасти в меридиональной проекции изменяются с помощью 8-ми параметров, а распределение толщин лопасти – 4 параметрами.

В §2.5 предлагаются ограничения в постановке оптимизационной задачи: режимные и кавитационные. Использование традиционных краевых условий при моделировании течения в РК диктует постановку ограничения на напор,

гарантирующее выполнение требуемого режима работы ГТ. Предложенные в работе альтернативные входные и выходные краевые условия удовлетворяют режимным ограничениям автоматически. Ограничение на размер области кавитации ставится в виде $S_{\text{кав}} / S_{\text{лоп}} < 0.15$, где $S_{\text{кав}}$ – площадь зоны на тыльной поверхности лопасти, на которой давление p ниже давления насыщенного пара.

В §2.6 формулируются новые целевые функционалы, позволяющие непосредственно максимизировать КПД ГТ на одном или нескольких режимах ее работы. Ранее² при расчете течения в рамках уравнений Эйлера непосредственный расчет вязких потерь, а значит и КПД, был невозможен. В этом случае использовались критерии, косвенно учитывающие потери энергии в проточном тракте. Задавался функционал F_1 , равный кинетической энергии потока в выходном сечении РК. Его минимизация приводит к увеличению сработки напора на РК. Функционал F_2 характеризовал отклонение линий тока на поверхности лопасти от осесимметричного потока

$$F_2 = \frac{1}{S} \int_S (1 - \sigma(\beta) \cdot \cos \beta) dS, \quad (9)$$

где β – угол между линией тока на поверхности лопасти и осесимметричного потока, S – площадь поверхности лопасти, $\sigma(\beta) = 1$ при $\beta < \pi/2$, $\sigma(\beta) = \sigma_0$ в остальных случаях. Минимизация F_2 позволяет уменьшать профильные потери. Функционал F_3 характеризовал относительный размер области кавитации.

В диссертации предлагаются новые целевые функционалы. Функционал F_4 характеризует силовое воздействие потока на входную кромку лопасти

$$F_4 = \int_S |\Delta p_n| ds, \quad (10)$$

где Δp_n – перепад давлений между тыльной и рабочей сторонами лопасти на входной её кромке площадью S . Минимизация F_4 приводит к уменьшению «ударных» потерь на входе в лопастную систему. Использование предложенных в работе экономичных комбинированных методик определения потерь энергии позволяет проводить непосредственную максимизацию КПД на заданном режиме работы ГТ, полагая в качестве целевого функционала $F_5 = \eta$. Обычно выбор проточной части осуществляется по значениям КПД на нескольких режимах ее работы, отвечающих различным расходам Q . В диссертации для получения геометрии ПЧ, обладающей требуемой зависимостью $\eta_0(Q)$ предлагается новый критерий, заключающийся в минимизации функционала

$$F_6 = \sum_{l=1}^L \delta_l \cdot |\eta_0(Q_l) - \eta_l|, \quad (11)$$

где L – число режимов, на которых проводятся гидродинамические расчеты. Ещё один новый функционал, предложенный в диссертации, есть $F_7 = \max(\sigma_{\text{экав}})$. Постановка задачи оптимизации (5)-(8) с одновременной минимизацией функционалов F_6 и F_7 является новой.

В §2.7 предложена модификация операторов многокритериального генетического алгоритма для решения задачи многорежимной оптимизации, заключающаяся в новом способе выполнения ограничений оптимизационной задачи с помощью метода штрафных функций. Такая модификация учитывает не только число невыполненных ограничений⁶, но и насколько сильно они не выполнены.

В §2.8 строится алгоритм параллельной реализации разработанного комплекса программ оптимизационного проектирования на многопроцессорных вычислительных системах, позволяющий в десятки раз сократить время решения задач оптимизации.

Глава 3 посвящена решению ряда задач оптимизационного проектирования и анализу течения в спроектированных проточных частях.

В §3.1 представлены результаты решения задач проектирования и анализа течения ГТ Богучанской ГЭС. Приводятся размеры расчетных сеток и параметры численных алгоритмов. Проводится расчетное построение УХ по комбинированным методикам определения потерь энергии. Определяются линии постоянного открытия НА (рис. 2) и изолинии КПД в широком диапазоне режимных параметров. Сравнение с экспериментальными данными показало, что ошибки в определении расхода не превышают 1.5%, КПД – 2%. Наибольшие отличия наблюдаются на неоптимальных режимах работы ГТ. Наилучшие результаты дает комбинированная методика НА-РК-ОТ (рис. 3). Она же требует наибольших затрат вычислительных ресурсов. Решается серия задач оптимизационного проектирования РК: максимизация КПД на одном заданном режиме работы и одновременно на трёх режимах работы ГТ, получение требуемой зависимости $\eta_0(Q)$ и увеличения запаса прочности посредством одновременно минимизации функционалов F_6 и F_7 . В результате решения задач получены геометрии РК, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. Для определения эффективности и ускорения реализованного параллельного алгоритма проводится серия расчетов тестовой задачи с использованием от 1 до 60 процессоров. Ускорение счета линейно зависит от числа процессоров, а параллельная эффективность не опускается ниже 70%.

В §3.2 проводится расчет и анализ структуры потерь энергии в проточном тракте турбины ГЭС Платановрисси (рис. 4). С использованием инженерных полуэмпирических формул и кинематики пространственного потока рассчитаны зависимости ударных, профильных и вторичных потерь энергии (4) в РК. В отсасывающей трубе рассчитаны потери энергии из-за трения потока об ее стенки, вихревого жгута и циркуляционные потери. Показано, что основное влияние на положение оптимума УХ оказывают ударные потери энергии в РК и циркуляционные потери энергии в отсасывающей трубе.

⁶ Fonseca C.M., Fleming P.J. Genetic algorithm for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization // Proc. 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. – 1993. – P.416-423.

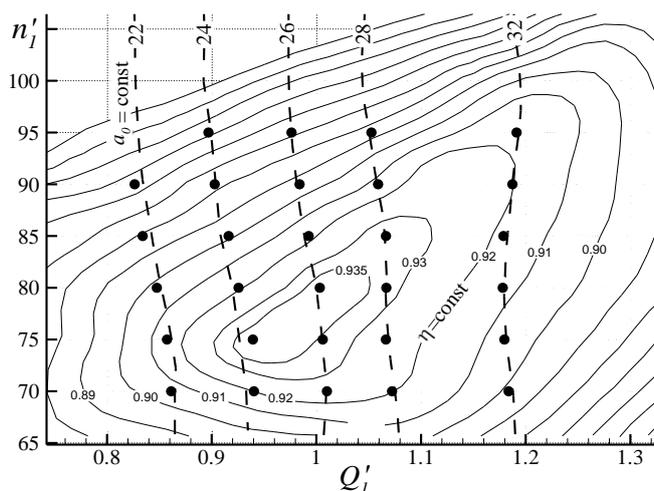


Рис. 2. Линии постоянного открытия
НА a_0 в области $Q'_1 - n'_1$:
----- эксперимент;
• – расчет (НА-РК-ОТ).

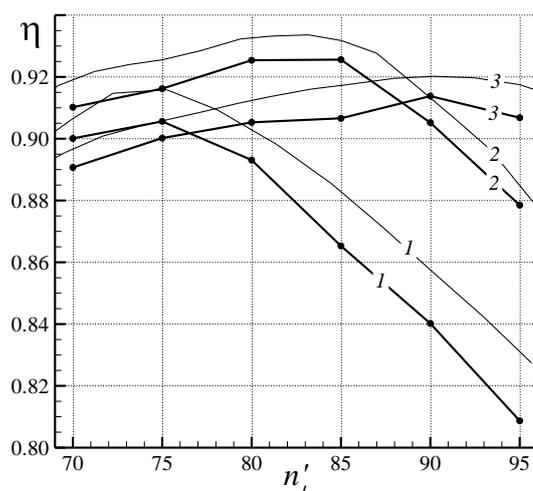


Рис. 3. Зависимости КПД
при $a_0 = \text{const}$: 22мм (1), 28мм (2),
32мм (3), — – эксперимент;
—•— – расчет (НА-РК-ОТ).

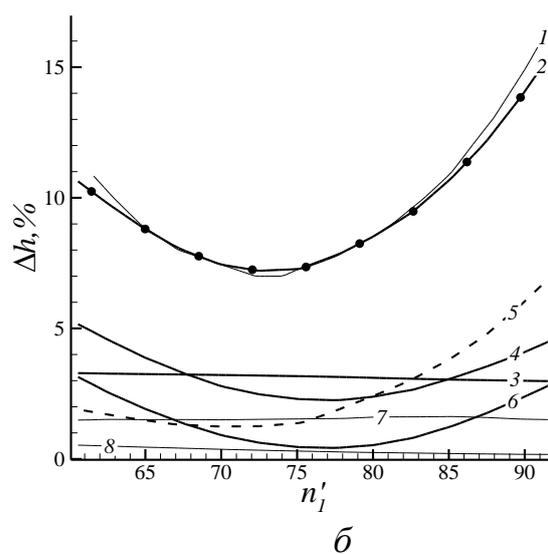
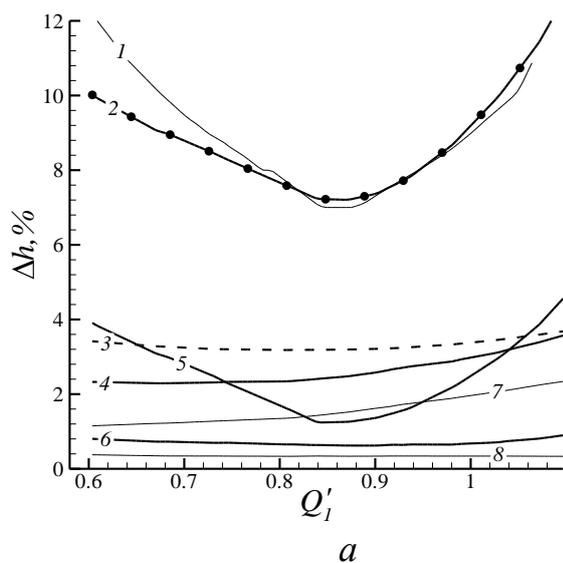


Рис. 4. Зависимости потерь энергии в элементах ГТ ГЭС Платановрисси от
расхода при $n'_1 = n'_{1,onn}$ (а) и от оборотов при $Q'_1 = Q'_{1,onn}$ (б):

1 – суммарные потери (эксперимент); 2 – суммарные потери (расчет НА-РК); 3 – суммарные потери в СК, СТ, НА; 4 – суммарные потери в РК; 5 – суммарные потери в ОТ; 6 – ударные потери в РК; 7 – профильные потери в РК; 8 – вторичные потери в РК.

В §3.3 предложенная в Гл. 2 методика применена для оптимизационного проектирования РК ГТ Гоцатлинской ГЭС. Сначала рассчитывается течение в прототипе РК, выявляются его недостатки. Затем ставится оптимизационная задача, направленная на их устранение. Анализируется полученный фронт Парето и выбирается геометрия, обладающая кинетической энергией

уменьшенной на 20% в сечении сразу за лопастями РК и на 6% в сечении на входе в отсасывающую трубу. Далее проводятся расчеты прецессии вихревого жгута в отсасывающей трубе на режиме неполной загрузки с оптимизированным рабочим колесом и колесом исходного прототипа. Отношение амплитуды пульсаций давления A к полному напору H в проточном тракте с оптимизированным рабочим колесом уменьшено до 1.8% по сравнению с 2.5% у прототипа (рис. 5).

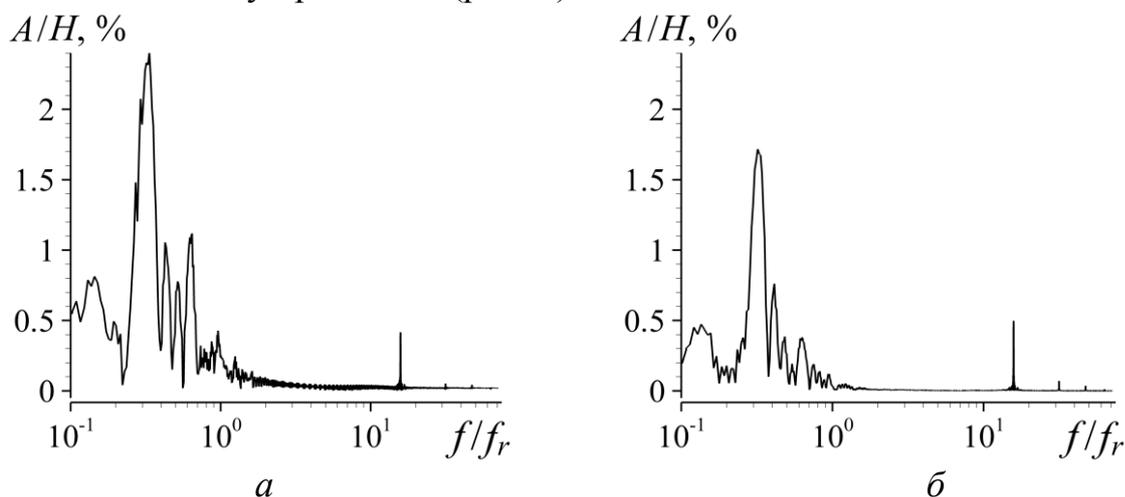


Рис. 5. Спектр пульсаций на режиме частичной загрузки для геометрий рабочего колеса прототипа (а) и оптимальной – (б) (f_r – частота вращения колеса).

В §3.4 анализируются результаты решения задачи оптимизационного проектирования радиально-осевого РК ГТ Сангтудинской ГЭС. Одновременная минимизация функционалов F_1 и F_2 при ограничениях на напор и область кавитации не дала единственного решения, функционалы являются конфликтующими, т.е. минимизация одного функционала приводит к возрастанию другого. Результатом решения задачи является множество геометрий, составляющих оптимальный фронт Парето (рис.6). Выбор конкретной геометрии с фронта Парето зависит от предпочтений отдаваемых какому-либо целевому функционалу. Проведена минимизация трёх функционалов F_1 , F_2 и F_4 . На рис. 6 оттенками серого цвета представлен полученный фронт Парето. Видно, что все функционалы являются конфликтующими. В качестве оптимальной выбрана лопасть *Opt-3* с уменьшенным силовым воздействием на входную кромку лопасти, отсутствием противотоков в лопастной системе и кинетической энергией потока за рабочим колесом не большей, чем у прототипа.

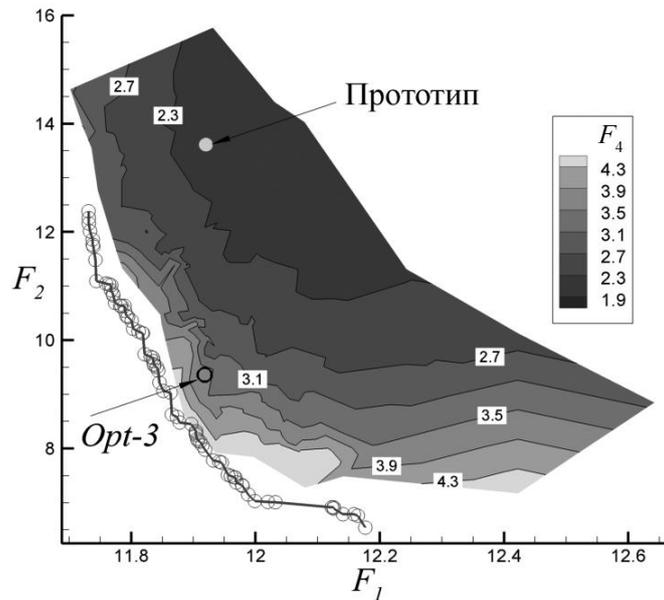


Рис. 6. Сравнение фронтов Парето, полученных при двухцелевой (линия $-\circ-$) и трёхцелевой оптимизации (оттенки серого).

В *заклучении* сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Разработана методика расчета гидродинамических потерь энергии, объединяющая моделирование пространственных турбулентных течений и инженерных полуэмпирических формул. Такой подход позволяет за короткое время получать оценки энергетических характеристик всей проточной части гидротурбины.
2. Предложена методика расчетного построения прогнозной УХ гидротурбины, позволяющая определять параметры оптимального режима и характер зависимости КПД от режимных параметров.
3. Разработано программно-методическое обеспечение для численного моделирования и анализа стационарных течений в гидротурбинах. Выполнено численное построение прогнозных УХ турбин Богучанской ГЭС и ГЭС Платановрисси и сопоставление с экспериментальными УХ. Показано, что предложенные методики определения гидравлических потерь и построения прогнозной УХ дают результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными и применимы в широком диапазоне режимных параметров. На основе анализа характера зависимостей потерь энергии, показано, что основное влияние на положение оптимума УХ оказывают ударные потери в рабочем колесе и циркуляционные потери в отсасывающей трубе.
4. Сформулирована новая постановка задачи многорежимного оптимизационного проектирования, заключающаяся в учете зависимостей энергетических и прочностных характеристик гидротурбины от режимов её работы. Проведено обобщение генетического оптимизационного алгоритма для решения задач многорежимной оптимизации. Расширена

параметризация проточного тракта гидротурбины, позволяющая более гибко и полно варьировать геометрию рабочего колеса, для решения задачи выбора его оптимальной формы.

5. Предложен и реализован параллельный алгоритм для решения задачи оптимизационного проектирования на многопроцессорных вычислительных системах.
6. Проведена верификация созданных алгоритмов и решен ряд прикладных задач о проектировании оптимальной формы рабочего колеса гидротурбины и анализе течения в ее проточном тракте.

Список основных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Многорежимная оптимизация формы рабочего колеса гидротурбины // *Вычислительные технологии*. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С. 32-50.
2. Астракова А.С., Банников Д.В., Лаврентьев М.М.(мл), Черный С.Г. Применение генетического алгоритма к задаче оптимального расположения датчиков // *Вычислительные технологии*. – 2009. – Т. 14. – № 5. – С. 3-17.
3. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Оптимизационное проектирование формы проточной части гидротурбины и анализ течения в ней // *Вычислительные технологии*. – 2010. – Т. 15. – № 5. – С. 73-94.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

4. Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Ешкунова И.Ф., Банников Д.В., Авдюшенко А.Ю., Скороспелов В.А., Турук П.А. Численное моделирование нестационарных пространственных течений в каналах решеток гидротурбин // *Мат. VIII межд. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях*, Алушта, 25-31 мая 2010. – М: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – С. 72-75.
5. Astrakova A.S., Bannikov D.V., Cherny S.G., Lavrentiev M.M. Jr. The determination of the optimal sensors' location using genetic algorithm // *Proc. of the 3rd Nordic EMW Summer School for PhD Students in Mathematics*, Turku, Finland, June, 2009. – TUSC General Publications. – N 53. – 2009. – P. 5-22.
6. Черный С.Г., Лапин В.Н., Чирков Д.В., Банников Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Вычислительные методы моделирования и оптимизационного проектирования в гидродинамике водяных турбин // *Мат. XVI межд. конф. ВМСППС*. Алушта, 2009. – М: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – С. 752-754.
7. Bannikov D.V., Cherny S.G., Chirkov D.V., Demianov V.A., Pylev I.M., Skorospelov V.A., Stepanov V.N. Automatic optimal shape design of hydroturbine flow passage // *Proceedings of HYDRO 2008 Int. Conf.*, Ljubljana, Slovenia, 6 – 8 October, 2008. – CD-ROM. – P. 1-6.
8. Bannikov D.V., Cherny S.G., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A. Multi-regime shape optimization of hydroturbine flow passage [Electronic

resource] // *Proc. of XIV-th International Conference on the Methods of Aerophysical Research* (ICMAR 2008), Novosibirsk, 30 June – 6 July, 2008.– CD-ROM. – P. 1-6.

9. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Турук П.А., Скороспелов В.А., Пылев И.М. Методика определения энергетических характеристик гидротурбины на основе расчетов пространственного потока и экспериментальных данных // Совм. вып. *Вычислительные технологии* – 2008 – Т.13. – Ч.1. – *Вестник КазНУ* – 2008. – № 3 (58), по материалам Межд. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» – Алма-ата. – С. 196-202.

10. Bannikov D.V., Lobareva I.F., Cherny S.G., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A. Multiobjective optimization in problems of hydrodynamics of turbomachines // *Proc. of XIII-th International Conference on the Methods of Aerophysical Research* (ICMAR 2007), Novosibirsk, 5 - 10 February 2007. – Novosibirsk – 2007. – Part 1. – P. 22-27.

11. Банников Д.В. Многоцелевая оптимизация формы проточной части радиально-осевой гидротурбины // Труды XLV Межд. студ. конф. «*Студент и научно-технический прогресс*», Новосибирск. – 2007. – С. 10-19.

12. Банников Д.В. Автоматизированное проектирование форм рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины // Труды XLIV Межд. студ. конф. «*Студент и научно-технический прогресс*», Новосибирск. – 2006. – С. 181-187.

Публикации в тезисах международных и всероссийских конференций

13. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Совершенствование проточной части гидротурбины методами математического моделирования // Тез. докл. всероссийской конф. «Математика в приложениях», приуроченной к 80-летию академика С.К.Годунова (Новосибирск, 20-24 июля 2009 г.) – Новосибирск: Изд. инст. математики СО РАН. 2009. – С.35-36.

14. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А. Оптимизационное проектирование формы гидротурбины на основе численного моделирования пространственных течений и эмпирических зависимостей // Тез. докл. межд. конф. «Современные проблемы вычислительной математики и математической физики» памяти и к 90-летию А.А. Самарского. – М.: Издательский отдел факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова; МАКС Пресс. Москва, 16-18 июня 2009. – С. 292-293.

15. Черный С.Г., Чирков Д.В., Банников Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Численное моделирование нестационарных течений в гидротурбине на многопроцессорных системах // Тезисы докладов V Сибирской конференции по параллельным и высокопроизводительным вычислениям (Томск, 1-3 декабря, 2009 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009.– С. 50-51.

16. Астракова А.С., Банников Д.В., Лаврентьев М.М. (мл.), Черный С.Г., Численный метод решения обратных задач на основе генетического алгоритма // Молодёжная межд. научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач». – Новосибирск, 10-20 августа 2009. – С. 18-19.

Банников Денис Викторович

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРОТУРБИН
И АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ В НИХ
МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 04.08.2010 г.

Формат 60 × 84 1/16

Уч.-изд. л. 1.25.

Заказ №

Тираж 100 экз.

Редакционно-издательский центр НГУ
630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2.