

На правах рукописи

Черный Сергей Григорьевич

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ В ГИДРОДИНАМИКЕ
ТУРБОМАШИН

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2006

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий Сибирского
отделения РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Воеводин Анатолий Федорович

член-корреспондент РАН, доктор физико-
математических наук, профессор Гушин
Валентин Анатольевич

доктор физико-математических наук,
профессор Куропатенко Валентин Федорович

Ведущая организация: Вычислительный центр
им. А.А. Дородницына РАН

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 15 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 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. Лаврен-
тьева, 6 (dsovet@ict.nsc.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном за-
ле вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН

Автореферат разослан

« »

2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Л.Б. Чубаров

Актуальность проблемы. Создание новых перспективных гидротурбин и питательных насосов стало весьма актуальной проблемой, необходимость решения которой обусловлена тенденцией роста требований к их техническим характеристикам. В связи с этим остается востребованной задача построения эффективных методов моделирования пространственных течений несжимаемой жидкости. Трудности решения этой задачи обуславливаются сложной геометрией проточного тракта и большим количеством физических явлений протекающих в нем.

В каждом элементе проточного тракта турбомашин в потоке доминируют физические процессы, характерные именно для этого сегмента. В соответствии с этим необходимо выбирать подходящие модели и ставить для них корректные задачи для адекватного описания течений в этих сегментах. С одной стороны модель должна отображать основные особенности течения, а с другой – быть экономичной. Например, на потери энергии в отсасывающей трубе гидротурбины значительное влияние оказывают вязкие свойства жидкости. Также они играют доминирующую роль в механизме формирования и эволюции прецессирующего вихревого жгута за рабочим колесом, оказывающего значительное влияние на работу всей турбины. Поэтому для адекватного описания течения в отсасывающей трубе и подобных ей элементах турбомашин необходима эффективная турбулентная модель.

Моделирование течений в гидротурбинах и питательных насосах основывается главным образом на решении уравнений Эйлера и Рейнольдса несжимаемой жидкости. Разработка новых разностных алгоритмов для численного интегрирования этих уравнений стимулируется, с одной стороны, возрастающими требованиями к точности численных расчетов, а, с другой сторон, необходимостью проведения расчетов в неста-

ционных постановках во всем проточном тракте за приемлемое время. Использование неравномерных сеток с малыми пространственными шагами ставит проблему создания неявных разностных схем с большим запасом устойчивости и эффективной разрешимостью, сопоставимой с явными алгоритмами. Необходимость проведения серийных расчетов диктует высокие требования к быстродействию алгоритмов и экономичному расходованию памяти ЭВМ. Немаловажным аспектом является универсальность численного метода, то есть отсутствие необходимости подбора множества настроечных параметров. Эти требования определяют актуальность разработки новых абсолютно устойчивых, экономичных разностных схем повышенного порядка аппроксимации для моделирования задач механики сплошной среды.

Гидродинамическое моделирование форм компонент турбомашин, то есть выбор их геометрических параметров, при которых выполняются предъявляемые к турбомашинам требования, проводится, как правило, методом «ручного» возмущения относительно известной геометрии прототипа и оценки влияния этого возмущения на гидродинамические характеристики. Такой подход затрудняет совершенствование форм в направлении повышения качества турбомашин, так как для этого требуется перебор большого количества комбинаций их геометрических параметров и анализ соответствующих гидродинамических полей. Поэтому чрезвычайно актуальной является задача формализации и автоматизации этого процесса путем постановки и решения соответствующей оптимизационной задачи, основывающемся на последовательности расчетов трехмерных течений и выборе формы, обеспечивающей минимум заданных целевых функционалов. Использование при этом уравнений Эйлера оправдано быстротой их численного решения и малостью влияния на поток в рабочем

колесе вязких эффектов. Однако, явный расчет потерь энергии в этом приближении невозможен. Поэтому важно сформулировать целевые функционалы, позволяющие косвенно учитывать различные виды потерь через улучшение кинематических свойств потока.

Актуальной является проблема разработки алгоритма многоцелевой оптимизации. Поскольку при оптимизации форм турбомшины необходимо учитывать ряд функционалов качества, таких как, например, кавитационные характеристики, эффективность работы турбины в нескольких режимах.

Цель работы заключается в постановках новых задач численного моделирования течений в проточных трактах турбомашин, создании новых численных методов расчета пространственных невязких и турбулентных, стационарных и нестационарных течений в них, в их верификации путем сравнения с экспериментальными и расчетными данными других авторов, установлении базовых свойств этих течений и влияния на них определяющих параметров, в решении оптимизационных задач автоматизации процесса проектирования форм турбомашин с использованием новых постановок задач и оригинальных численных алгоритмов.

Методология исследования опирается на современные информационно-вычислительные технологии, включающие адекватные физико-математические модели изучаемых явлений (трехмерные уравнения Эйлера и Рейнольдса несжимаемой жидкости), эффективные вычислительные алгоритмы (метод конечных объемов, конечно-разностные схемы, методы оптимизации), принципы создания проблемно-ориентированных программных комплексов.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем. В диссертации сформулированы постановки новых задач численного моделирования течений в турбомашинах с учетом различных физических факторов, задач одноцелевой и многоцелевой оптимизации форм турбомашин. Созданы оригинальные эффективные численные методы и алгоритмы решения поставленных задач. Для реализации предложенной вычислительной методологии создана иерархия эффективных информационно-программных средств. С использованием предложенной вычислительной технологии решены новые важные прикладные задачи гидродинамики турбомашин.

Теоретическое значение. Предложен единый методологический подход проведения вычислительного эксперимента и оптимизации форм в гидродинамике турбомашин, включающий иерархию постановок задач, систему физико-математических моделей и оригинальные численные алгоритмы. Получены теоретические и численные оценки эффективности созданных алгоритмов, проведена их верификация. Установлены базовые свойства изученных течений, в частности выявлены механизмы формирования прецессирующего вихревого жгута в конусе отсасывающей трубы и его воздействие на поток вверх и вниз по течению.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты доведены до алгоритмов, которые могут быть использованы при проектировании перспективных конструкций турбомашин. Алгоритмы позволяют без проведения дорогостоящих экспериментов получать интегральные и локальные характеристики течений в турбомашинах. Алгоритмы оптимизации формы лопасти рабочего колеса гидротурбины обеспечивают проведение автоматического перебора раз-

личных комбинаций геометрических параметров и отыскание формы, удовлетворяющей заданным критериям ее качества.

Результаты диссертационной работы (методология, модели, алгоритмы, программные системы, результаты расчетов) используются в проектных исследованиях в филиале ОАО «Силловые машины» «Ленинградский металлический завод».

Обоснованность и достоверность основных результатов, полученных в диссертации, основывается на строгом математическом описании разработанных численных алгоритмов, полученных априорных оценках этих алгоритмов, детальном методическом расчете широко известных и рекомендуемых тестовых задач, сопоставлении результатов численных расчетов с данными экспериментов и результатами, полученными другими авторами.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту

1. Предложены новые постановки задач численного моделирования трехмерных стационарных и нестационарных, невязких и турбулентных течений в турбомашине, задач одноцелевой и многоцелевой оптимизации форм проточного тракта.
2. Созданы новые эффективные численные методы решения трехмерных уравнений движения несжимаемой жидкости и уравнений моделей турбулентности на основе метода искусственной сжимаемости, конечных объемов и экономичного метода типа попеременно-треугольного обращения неявного оператора, имеющие второй порядок аппроксимации по времени и второй или третий по пространственным переменным. Разработаны численные алгоритмы решения задач одноцелевой и

многоцелевой оптимизации и автоматического проектирования формы лопасти рабочего колеса гидротурбины.

3. Получены теоретические и численные оценки эффективности разработанных численных методов и алгоритмов, проведена их верификация.
4. На основе результатов численного моделирования установлены базовые свойства пространственных течений в гидротурбинах различного типа и питательном насосе при различных режимах их работы. Определены механизмы формирования прецессирующего вихревого жгута и его воздействию на течение вверх и вниз по потоку.
5. Решен ряд конкретных задач оптимизации лопастей радиально-осевых гидротурбин с использованием оригинальных целевых функционалов, позволивших в рамках модели невязкой жидкости минимизировать гидродинамические потери.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 14-й, 16-й и 17-й Международных школах-семинарах по численным методам механики вязкой жидкости (Новосибирск, 1994, 1998, 2000), 10-й Международной научно-технической конференции по компрессорной технике (Казань, 1995), Международной конференции «Математические модели и численные методы механики сплошной среды» (Новосибирск, 1996), 8-й и 12-й Международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR, Новосибирск, 1996, 2004), 3-й Конференции по проблемам вычислительных методов динамики жидкости (ECCOMAS, Франция, Париж, 1996), Научно-технической конференции «Использование методов математического моделирования в котельной технике» (Красноярск, 1996), 11-й и 12-й Всероссийских конференциях «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики», посвященных памяти К.И. Бабенко (Пущино,

1996, Новороссийск, 1998), Международной конференции «Математические модели и методы их исследования» (Красноярск, 1997), Международном семинаре «Закрученные течения в энергетических и химических технологиях» (Норвегия, Трондхейм, 1997), 3-м и 4-м Сибирских конгрессах по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ, Новосибирск, 1998, 2000), Международном симпозиуме «Актуальные проблемы физической гидроаэродинамики» (Новосибирск, 1999), Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика» (RDAMM-2001, Новосибирск, 2001), Международной конференции «Вычислительные технологии и математические модели в науке, технике и образовании» (BTMM-2002, Казахстан, Алматы, 2002), Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2003, Владимир, 2003), Международных конференциях «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (ВИТ, Казахстан, Усть-Каменогорск, 2003, Алматы, 2004), Всероссийской конференции «Математика, информатика, управление» (Иркутск, 2004), 1-м Казахстанско-Германском совещании по высокопроизводительным вычислениям (Казахстан, Алматы, 2005), 11-м Международном симпозиуме по нестационарной аэродинамике, аэроакустике и аэроупругости турбомашин (Москва, 2006), обсуждались на семинарах в Институте вычислительных технологий СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Институте теплофизики СО РАН, Институте гидродинамики СО РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий лично автору) 1 монография (13/7

печ. л.), 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для представления результатов докторских диссертаций (6,2/3,1 печ. л.), 5 – в международных рецензируемых журналах (6,3/4 печ. л.), 8 – в трудах международных конференций (4,3/2,1 печ. л.). Основные результаты диссертации содержатся в работах [1-23], список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. В совместных публикациях по теме диссертации автору принадлежат постановка задачи, концепция исследования, разработка соответствующего алгоритмического и программного инструментария, общая методика проведения вычислительных экспериментов [1, 4, 5, 9-12, 14, 17, 19-23]. В работах [15, 16] автором выполнялись исследования моделей, конструирование численных алгоритмов и анализ результатов, относящихся к задачам гидродинамики несжимаемой жидкости. В работах, связанных с численным моделированием аспирации аэрозольных частиц [6-8], автор осуществлял постановку задачи, разработку численного алгоритма решения трехмерных уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости, интерпретацию соответствующих результатов. В публикациях, посвященных решению задач оптимизации формы лопасти гидротурбины [2, 3, 13, 18] под руководством автора выполнялись постановка задач, конструирование алгоритмов, проведение вычислительных экспериментов и интерпретация результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Список литературы содержит 200 наименований. Общий объем диссертации составляет 280 страниц, включая 11 таблиц и 150 рисунков.

Содержание диссертации

Во введении обсуждаются особенности изучаемого класса задач гидродинамики турбомашин, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, кратко излагается содержание диссертации по главам.

Течения рабочих тел в проточных трактах рассматриваемых в диссертации турбомашин могут быть описаны уравнениями Эйлера и Рейнольдса несжимаемой жидкости. Анализ этих уравнений и построение численных алгоритмов их решения представлен в работах О.М. Белоцерковского, Н.Н. Яненко, В.А. Гущина, А.Ф. Воеводина, В.Н. Коньшина, А.А. Приходько, Е.М. Смирнова, В.В. Риса, Д.К. Зайцева, И.А. Белова, С.А. Исаева, В.А. Коробкова, Р. Темама, Ф. Харлоу, А. Чорина, С. Роджерса, Д. Квака, Х. Дайгуджи и др. Особое внимание уделяется публикациям, в которых используются абсолютно устойчивые разностные схемы повышенного порядка аппроксимации. При этом важно, чтобы базирующиеся на этих схемах численные алгоритмы были экономичными.

Проводится обзор работ, в которых рассматриваются вопросы моделирования пространственных течений в элементах турбомашин. Численный анализ особенностей таких течений представлен в работах Г.Ю. Степанова, В.И. Гнесина, Е.М. Смирнова, В.В. Риса, Г.И. Топажа, А.А. Жарковских, А.В. Захарова, Г.Л. Подвидза, Ф.Т. Заболотного, Г.А. Соколовского, Х. Дайгуджи, А. Рупрехта и др.

Приведенная информация дает представление об имеющихся подходах решения поставленной задачи, об их достоинствах и недостатках, а также об основных моментах предлагаемого методологического подхода для решения поставленной задачи.

В главе 1 описаны различные постановки задачи численного моделирования течений в проточном тракте турбомашин, предлагаются методы ее решения.

В §1.1 приведены трехмерные уравнения Эйлера (невязкая модель) и осредненные по Рейнольдсу либо отфильтрованные на сеточном фильтре уравнения Навье-Стокса (турбулентная модель). Обе эти модели записаны в виде единой системы уравнений в дифференциальной форме

$$\mathbf{R}^t \mathbf{Q}_t + \mathbf{E}_{x_1} + \mathbf{G}_{x_2} + \mathbf{H}_{x_3} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{Q} = (p, u_1, u_2, u_3)^T, \quad \mathbf{R}^t = \text{diag}(0, 1, 1, 1), \quad \mathbf{F} = (0, f_1, f_2, f_3)^T,$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_1^2 + p - \tau_{11} \\ u_1 u_2 - \tau_{21} \\ u_1 u_3 - \tau_{31} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} u_2 \\ u_2 u_1 - \tau_{12} \\ u_2^2 + p - \tau_{22} \\ u_2 u_3 - \tau_{32} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} u_3 \\ u_3 u_1 - \tau_{13} \\ u_3 u_2 - \tau_{23} \\ u_3^2 + p - \tau_{33} \end{pmatrix}, \quad \tau_{ij} = \nu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Единая форма записи исходных систем уравнений облегчает построение вычислительных алгоритмов. Рассмотрены модели замыкания уравнений в случае турбулентного течения жидкости: модель с одним уравнением, стандартная $k-\epsilon$ модель для высоких чисел Рейнольдса, модифицированная $k-\epsilon$ модель турбулентности, $k-\epsilon$ модель турбулентности с демпфирующими функциями для низких чисел Рейнольдса, двухслойная $k-\epsilon$ модель турбулентности, модель Смагоринского замыкания подсеточных турбулентных напряжений. Описаны законы геометрического, динамического и кинематического подобия, выполнение которых необходимо обеспечивать при моделировании течений в турбомашинах. Также представлена сегментация области и постановка краевых условий на границах сегментов для моделей невязкого и турбулентного течений. Предложены и обоснованы оригинальные постановки задачи численного моделирова-

ния течений в турбомашинах, учитывающие различные физические факторы и позволяющие осуществлять различные стратегии при проведении расчетов. К ним относятся экономичная циклическая постановка, приближение замороженного колеса и полная нестационарная постановка задачи.

Параграф 1.2 посвящен методу решения основных уравнений, основанному на концепции искусственной сжимаемости, неявной конечно-объемной аппроксимации и приближенной LU- факторизации линеаризованной системы разностных уравнений. В пункте 1.2.1 приведен метод искусственной сжимаемости, заключающийся в добавлении в уравнения неразрывности и импульсов производных по псевдовремени τ от давления и компонент скорости. По псевдовремени в численном алгоритме организуется итерационный процесс на каждом шаге по физическому времени. Решение стационарных задач находится методом установления решения по физическому времени. В пункте 1.2.2 описывается неявная конечно-объемная аппроксимация модифицированных уравнений. Они записываются в форме интегральных законов сохранения для произвольного фиксированного объема V

$$\left(\mathbf{R}^\tau \frac{\partial}{\partial \tau} + \mathbf{R}^t \frac{\partial}{\partial t} \right) \int_V \mathbf{Q} dV + \oint_{\partial V} \mathbf{K} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \mathbf{F} dV, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \beta u_1 & \beta u_2 & \beta u_3 \\ u_1^2 + p - \tau_{11} & u_1 u_2 - \tau_{12} & u_1 u_3 - \tau_{13} \\ u_1 u_2 - \tau_{12} & u_2^2 + p - \tau_{22} & u_2 u_3 - \tau_{23} \\ u_1 u_3 - \tau_{13} & u_2 u_3 - \tau_{23} & u_3^2 + p - \tau_{33} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}^t = \text{diag}(1,1,1,1).$$

Затем дискретизируются

$$\left[\mathbf{R}^\tau \frac{(\mathbf{Q}^{n+1})^{s+1} - (\mathbf{Q}^{n+1})^s}{\Delta\tau} + \mathbf{R}^t \frac{3(\mathbf{Q}^{n+1})^{s+1} - 4\mathbf{Q}^n + \mathbf{Q}^{n-1}}{2\Delta t} \right] V = (\mathbf{RHS}^{n+1})^{s+1}, \quad (3)$$

где $\Delta\tau$ и Δt - шаг по псевдовремени и шаг по времени, соответственно; s - номер итерации по псевдовремени. Правая часть есть

$$\begin{aligned} \mathbf{RHS} = & -\left((\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i-1/2} + (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j-1/2} + \right. \\ & \left. + (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k-1/2} \right) + \mathbf{F}V \end{aligned}, \quad (4)$$

где $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i+1/2}$, $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j+1/2}$, $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k+1/2}$ представляют собой разностные потоки через грани $i + \frac{1}{2}jk$, $ij + \frac{1}{2}k$, $ijk + \frac{1}{2}$ ячейки с номером ijk и объемом V_{ijk} .

Рассмотрены аппроксимации невязких потоков, соответствующие схемам Чакравати-Ошера и MUSCL. Предложены два способа расщепления матрицы Якоби невязкого потока \mathbf{A} . В первом расщепление проводится по собственным значениям

$$\mathbf{A}^\pm = \mathbf{R}\mathbf{D}^\pm\mathbf{L}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4), \quad \lambda_{1,2} = U, \quad \lambda_{3,4} = U \pm \sqrt{U^2 + \beta \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}},$$

\mathbf{D}^\pm - диагональные матрицы, содержащие только положительные или отрицательные собственные значения \mathbf{D} , \mathbf{R} - матрица, столбцы которой являются правыми собственными векторами матрицы \mathbf{A} , \mathbf{L} - матрица, строки которой являются левыми собственными векторами матрицы \mathbf{A} . Во втором способе используется спектральный радиус \mathbf{A}

$$\mathbf{A}^\pm = 0,5(\mathbf{A} \pm \rho \mathbf{I}), \quad (6)$$

где

$$\rho = |U| + \sqrt{U^2 + \beta \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}}.$$

Описана аппроксимация вязких разностных потоков, имеющая второй порядок точности. В пунктах 1.2.3 - 1.2.4 изложены линейаризация дискретных уравнений по методу Ньютона и их приближенная LU-факторизация. В пункте 1.2.5 проведены априорные оценки метода на модельных уравнениях, показавшие, что построенный численный алгоритм в декартовой системе координат на равномерной сетке абсолютно устойчив и имеет третий порядок аппроксимации по пространственным направлениям и второй по времени. В пунктах 1.2.6-1.2.7 приведены способы реализации граничных условий и рекомендации по выбору коэффициента искусственной сжимаемости.

В §1.3 предлагается метод решения уравнений моделей турбулентности. Для облегчения построения численных алгоритмов каждое из уравнений k -е модели записывается в обобщенном виде

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\phi u_j - v^* \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = H, \quad (7)$$

где вид членов ϕ, v^* и H конкретизируется для каждого уравнения. В пунктах 1.3.2-1.3.4 для дискретизации уравнения, применяется неявный метод конечных объемов, определяются невязкие разностные потоки на гранях ячейки таким образом, чтобы результирующая разностная схема являлась противопотоковой схемой 2-го или 3-го порядков аппроксимации, проводится аппроксимация источниковых членов, в которой неявно аппроксимируются все слагаемые, имеющие отрицательные коэффициенты при искомым функциях. Это обеспечивает максимальную устойчивость численного алгоритма и возможность проведения расчетов в сложных областях на сильно неравномерных сетках. В следующих пунктах описывается линейаризация дискретного уравнения, его приближенная

LU-факторизация а также метод решения уравнений двухслойной модели турбулентности и численная реализация метода пристеночных функций.

В главе 2 приводится описание методики геометрической поддержки численного анализа течений в турбомашинах. Описаны геометрическое моделирование элементов проточного тракта турбомашин, методика построения сеток и обмен данными между сегментами. Отличительной особенностью созданного метода геометрического моделирования поверхностей проточного тракта турбомашин является использование квазиизометричной по обеим переменным параметризации, которая максимально отвечает требованиям методики построения сеток. В этом случае сетка на поверхности задается подходящими разбиениями единичных отрезков – областей изменения параметров. Область течения сегментируется на подобласти, топологически эквивалентные прямоугольному параллелепипеду, в них строятся регулярные сетки и находятся решения основных уравнений. Проводимая естественным образом сегментация проточного тракта турбомашин позволяет, с одной стороны, эффективно находить решения уравнений в каждом сегменте, а с другой стороны – строить в каждом сегменте достаточно качественные сетки, независимые от сеток соседних сегментов. Обмен данными между соседними сегментами осуществляется посредством В-сплайнов первой степени, как наиболее устойчивых к большим градиентам данных, не имеющих собственных осцилляций и обеспечивающих точность порядка h^2 , где h - максимальная длина ребра расчетной ячейки.

В главе 3 рассматриваются тестовые двумерные и трехмерные задачи, на которых изучаются основные свойства предложенного численного метода. Сравнение результатов проводится с известными точными реше-

ниями и экспериментальными данными. Особое внимание уделяется оценке аппроксимационного качества и эффективности метода.

В §3.1 была проведена серия расчетов стационарного и нестационарного вязкого ламинарного обтекания плоской пластины потоком несжимаемой жидкости. Во всех случаях получено хорошее соответствие результатов расчетов данным Г. Блазиуса и Г. Стокса.

В параграфах 3.2-3.3 приведены результаты расчетов турбулентных течений в плоском канале и в плоском канале за обратным уступом с использованием рассмотренных в пункте 1.1.2 моделей турбулентности. Цель исследований состояла в изучении и определении областей применимости данных моделей в зависимости от характера течения, а также в калибровке и уточнении эмпирических констант моделей. Определено оптимальное число перехода $Re_y^* = 100$ в двухслойной модели. Показано что использование в численном алгоритме расщепления матрицы Якоби A по собственным значениям (5)

дает более близкое к эксперименту распределение коэффициента трения C_f вдоль нижней стенки канала. Потеря точности при использовании расщепления (6) связана с излишней схемной вязкостью, свойственной этому расщеплению.

В § 3.4 рассмотрены задачи невязкого, вязкого ламинарного стационарного и нестационарного обтекания цилиндра. Первая задача имеет аналитическое решение, а две последние исследованы экспериментально и численно многими авторами. Проведенные сравнения количественных характеристик, полученных на основе предложенного алгоритма, с точным решением и данными других авторов показали, что предложенная в диссертации численная модель невязкой жидкости в случае схемы порядка аппроксимации выше первого дает решение, хорошо согласующееся с

данными классической невязкой модели, а расчеты в рамках уравнений Навье-Стокса адекватно описывают реальные течения. Установлено, что максимальная скорость сходимости решения к стационарному состоянию имеет место в случае выполнения полученной при анализе численного алгоритма оценки $\beta = \delta U_{хар}^2$, где $\delta = 5 \div 10$, $U_{хар}$ есть величина характерной скорости задачи.

Параграф 3.5 посвящен обсуждению особенностей применения классической модели невязкой жидкости и численной модели, построенной на основе уравнений Эйлера несжимаемой жидкости. Показано, что в отличие от классической модели, обладающей парадоксами нулевого лобового сопротивления и бесконечности скорости при гладком обтекании крылового профиля с угловой точкой на задней кромке, численная модель свободна от данного недостатка и дает решение, приближенное к действительности. Анализ результатов, проведенных в § 3.5 расчетов обтекания обратного уступа и в § 3.6 обтекания плоского крылового профиля в рамках идеальной жидкости, позволил определить механизм формирования рециркуляционной зоны за обратным уступом и выполнения условия Жуковского-Чаплыгина на угловой точке задней кромки профиля, связанный с наличием аппроксимационной вязкости в численной модели.

В параграфах 3.7-3.8 обсуждаются результаты решения задач о вязких ламинарных течениях в каналах квадратного и круглого сечений, изогнутых на 90° . Для оценки аппроксимационных свойств численного алгоритма расчеты в круглой трубе проведены на сетках двух типов. В первом случае в поперечном сечении строилась цилиндрическая сетка (рис. 1а), во втором случае – криволинейная неортогональная сетка, топологически эквивалентная сетке в прямоугольнике (см. рис. 1б). В обоих случаях получено хорошее соответствие рассчитанных параметров эксперименталь-

ным данным, что подтверждает эффективность алгоритма при моделировании подобного класса течений на существенно неортогональных и имеющих вырожденные шестигранные ячейки сетках.

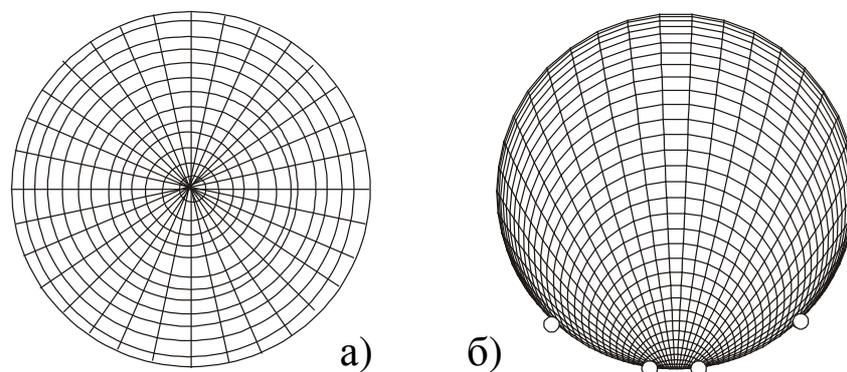


Рис. 1. Типы сеток в поперечном сечении трубы

Параграф § 3.9 посвящен моделированию вихревых структур в замкнутом цилиндре радиуса R с вращающимся со скоростью ω одним из торцевых граничных сечений. Возникающие здесь течения, в зависимости от величины числа $Re = \omega R^2 / \nu$, допускают появление в них очень чувствительной к физическим и схемным параметрам особенности – распада вихря (рис. 2).

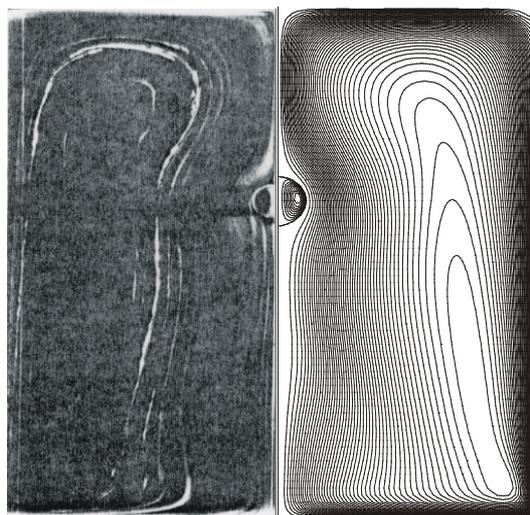


Рис. 2. Течение в замкнутом цилиндре с вращающимся дном: $Re=1492$,
слева – эксперимент, справа – расчет

Для оценки способности численного алгоритма разрешать распад вихря проведены сравнения структур течений в расчете и эксперименте

для режимов, в которых отсутствует распад ($Re = 1002$), распад вихря имеет одну ($Re = 1492$) и две ($Re = 1854$) рециркуляционных зоны. Показано, что построенный численный алгоритм улавливает и адекватно передает возникающую в структуре закрученного потока такую особенность.

Глава 4 посвящена моделированию течений в проточных трактах турбомашин. В § 4.1 рассмотрено течение в радиально-осевой гидротурбине (рис. 3). В пунктах 4.1.1- 4.1.2 проведено моделирование течения в рабочем колесе и отсасывающей трубе в приближении $k - \epsilon$ модели турбулентности. В пункте 4.1.3 представлены результаты расчетов течения в проточном тракте на трех режимах работы: режиме номинальной мощности, оптимального КПД и частичной загрузки. Моделирование проводилось в циклической постановке в приближении $k - \epsilon$ модели турбулентности.

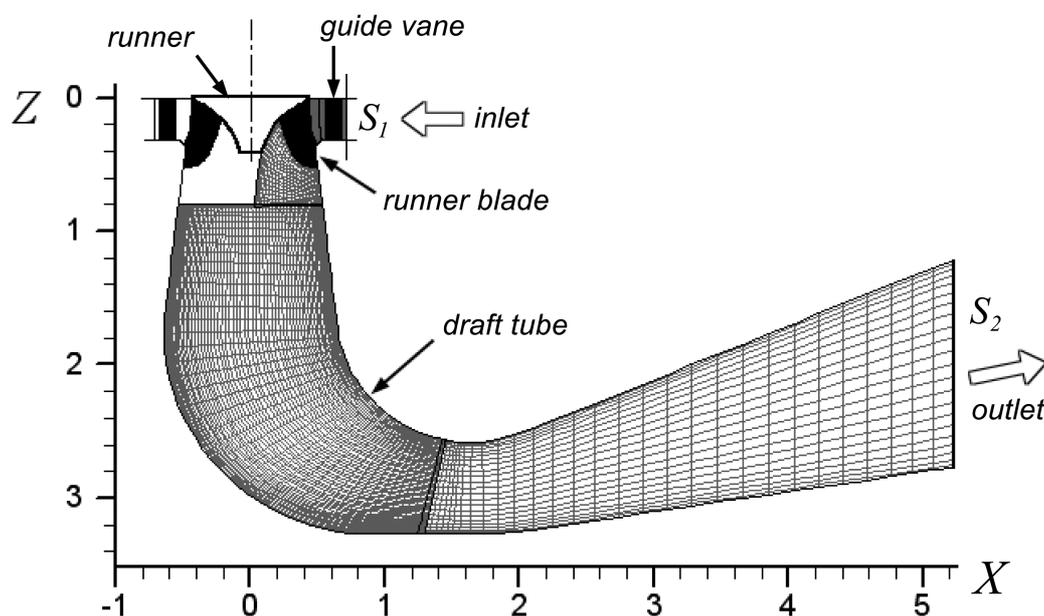


Рис. 3. Расчетная область и сетка для совместных расчетов

Показано хорошее совпадение полей скорости с экспериментальными данными. Проведен расчет потерь в проточном тракте гидротурбины. Размерные потери считались по двум различным формулам. Полученная

в расчете зависимость потерь от расхода близка к экспериментальной (рис.4).

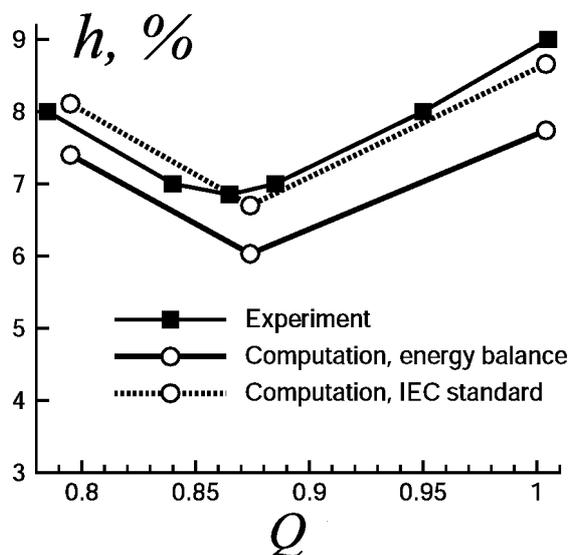


Рис. 4. Потери в проточном тракте гидротурбины на разных режимах работы

В пункте 4.1.4 рассчитано стационарное течение воды с помощью уравнений Эйлера во всем проточном тракте ГЭС Платановрисси в приближении замороженного колеса. В этом приближении положение колеса фиксируется относительно лопаток направляющего аппарата и отыскивается стационарное решение во всем проточном тракте. Вся область течения была разбита на 63 сегмента, общее количество ячеек сетки при этом составляло более одного миллиона. Показана окружная неравномерность течения при обтекании статорных колонн спиральной камеры и лопаток направляющего аппарата. В пункте 4.1.5 с помощью уравнений Эйлера рассчитывается течение воды в проточном тракте ГЭС Платановрисси, но уже в полной нестационарной постановке. Были рассмотрены три интересных режима работы гидротурбины Платановрисси: частичной загрузки, оптимального КПД и номинальной мощности. В радиально-осевой гидротурбине в режиме неполной загрузки за рабочим колесом возникает

прецессирующий вихревой жгут. В расчете, так же как и в эксперименте получена эта прецессия (рис. 5). Для того чтобы исследовать влияние прецессии, были проанализированы пульсации давления в неподвижных точках 1, 2, 3. Показано, что прецессия вихря влияет на поле течения в колесе и даже выше по потоку. Однако, это влияние уменьшается вдали от вихря.

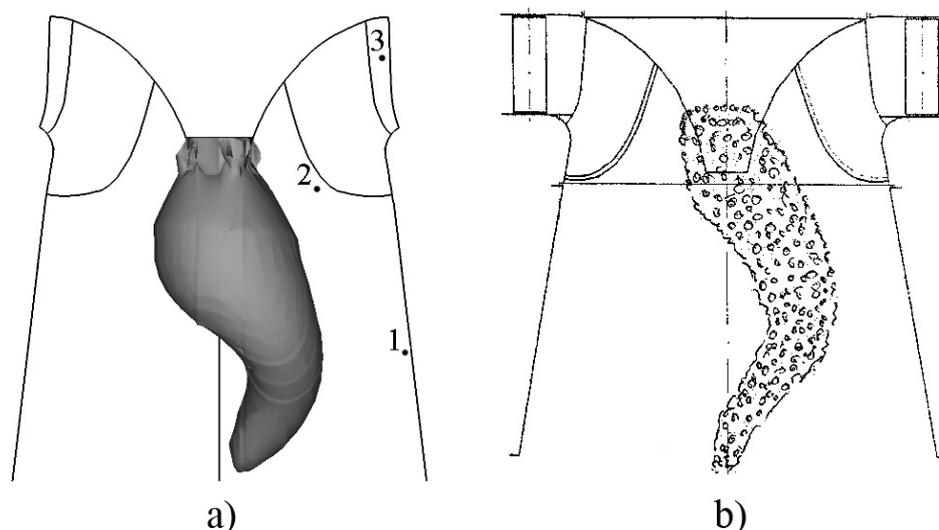


Рис. 5. Вихревой жгут в отсасывающей трубе при режиме неполной загрузки: а) – расчет, б) – эксперимент

В пункте 4.1.6 проведено моделирование вихревого жгута в коническом диффузоре и отсасывающей трубе методом крупных вихрей. В коническом диффузоре проводился расчет течения также в приближении RNG $k-\epsilon$ модели турбулентности, при этом наблюдалось стационарное осесимметричное течение с рециркуляционными зонами течений в осевом направлении.

В §4.2 излагаются результаты моделирования течений в поворотнолопастной гидротурбине. В пункте 4.2.1 был проведен расчет течения во всем проточном тракте Волжской ГЭС в приближении замороженного колеса и уравнений Эйлера. Показано, что окружная неравномерность, значительная перед направляющим аппаратом, на выходе из него практи-

чески отсутствует, это свидетельствуют о высокой степени достоверности предположения о цикличности течений в межлопастных каналах даже при небольшом числе лопастей. Проведено сравнение распределений давления P и цилиндрических составляющих скорости c_r , c_z и c_u , полученных в циклической постановке и приближении замороженного колеса, отличия не превосходят доли процента. Сделан вывод, что расчеты течений в циклической постановке для многих режимов течений дают результаты с вполне приемлемой точностью и при этом требуют очень маленьких затрат вычислительных ресурсов. В пункте 4.2.2 исследуется влияние протекания жидкости с рабочей на тыльную сторону лопасти через тонкий зазор в окрестности внешней ее кромки и корпуса, а также между внутренней кромкой и втулкой рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины ПЛ587а. Исследование проведено путем сравнения параметров течений, рассчитанных в приближении циклической модели в направляющем аппарате и рабочем колесе с учетом перетекания жидкости через зазор и без него. При расчетах применялись две модели несжимаемой жидкости: уравнения Эйлера и уравнения Рейнольдса со стандартной $k-\epsilon$ моделью турбулентности. Оказалось, что влияние зазоров на интегральные характеристики течения независимо от используемых моделей и сеток составляет от 0,5% до 2%. Установлена локальная область пониженного давления за тыльной стороной лопасти, наличие которой свидетельствует о том, что протекание жидкости через зазор инициирует образование вихря.

В §4.3 проведены расчеты течений в проточной части одной ступени питательного насоса, используемого на ТЭЦ, при различных режимах его работы. В приближении уравнений Эйлера были рассчитаны течения при фиксированной частоте вращения рабочего колеса n , равной 2980

об/мин, и объемах подач (расходах) Q , изменяющихся от 40 до 200 м³/ч. Проанализирована структура потока, показано, что используемые в упрощенных моделях допущения о том, что поверхности тока являются поверхностями вращения, не выполняются.

Глава 5 посвящена алгоритмам оптимизации форм лопастей гидротурбин. В § 5.1 излагаются постановка задачи оптимизации и схема ее решения (рис. 6).

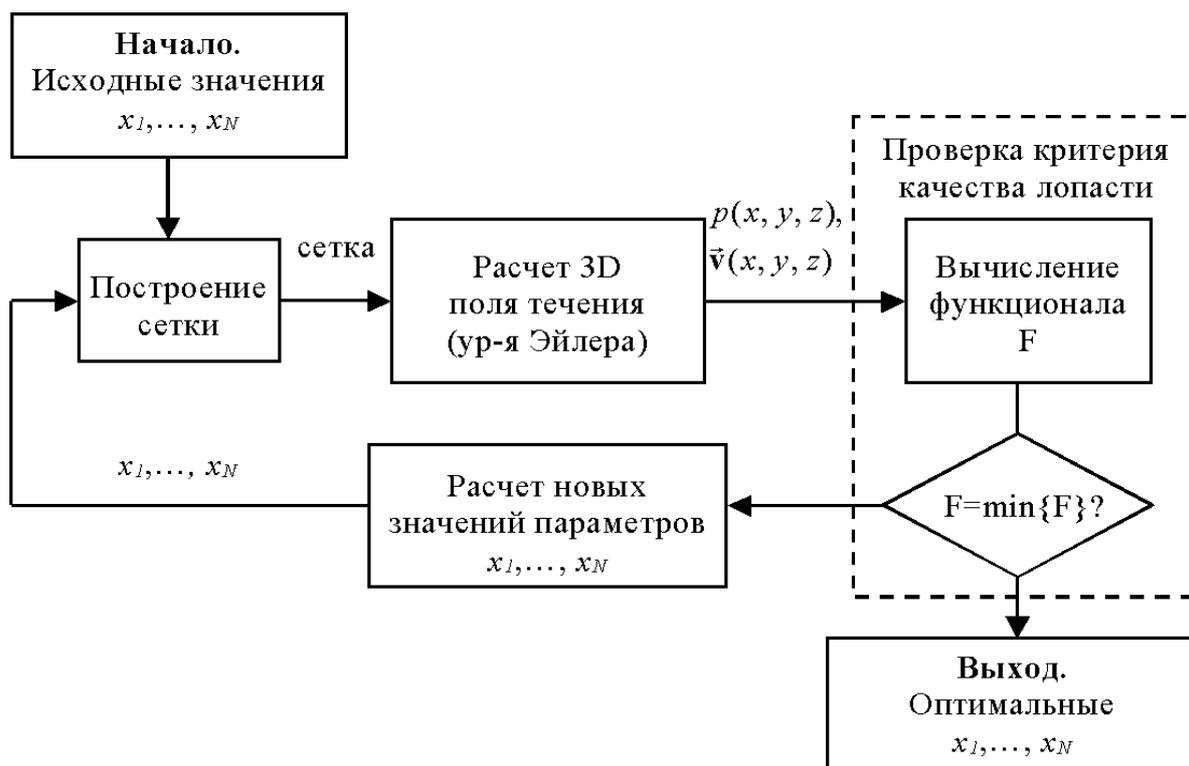


Рис. 6. Схема процесса оптимизации

В § 5.2 обсуждается «относительная» параметризация срединной поверхности лопасти бикубической функцией с 16-ю свободными параметрами, позволяющая гибко варьировать форму лопасти. В § 5.3 рассматриваются ограничения, которые ставились при оптимизации: ограничение на напор в рабочем колесе и кавитационное ограничение. Использование ограничения на напор гарантирует выполнение заданного режима работы колеса. Ограничение по кавитации ставилось в следующем виде:

$$\frac{S_{cav}}{S_{suc}} \leq 0,15, \quad (8)$$

где S_{cav} - площадь зоны на тыльной поверхности лопасти с давлением p , меньшим давления насыщенного пара.

В § 5.4 обсуждается важный вопрос формулировки целевых функционалов, в приближении уравнений Эйлера косвенно учитывающих потери энергии в проточном тракте через улучшение кинематических свойств потока. Это соответствует максимизации КПД на заданном режиме работы. Функционал F_1 определяется как кинетическая энергия в выходном сечении рабочего колеса. Выбор этой величины основывается на том, что наибольшая эффективность работы гидротурбины достигается в том случае, когда поток покидает рабочее колесо с минимальной кинетической энергией, которая считается потерянной. Функционал F_2 есть относительный размер области кавитации. Функционал F_3 - отклонение линий тока от «осесимметричного» потока

$$F_3 = \frac{1}{S} \int_S (1 - \sigma(\beta) \cos \beta) dS, \quad (9)$$

где S - площадь поверхности лопасти, β - угол между предельной линией тока и линией тока осесимметричного потока, а весовая функция σ имеет вид

$$\sigma(\beta) = \begin{cases} 1, & \beta < \pi/2, \\ \sigma_0, & \beta \geq \pi/2. \end{cases} \quad (10)$$

Такой выбор функционала основан на представлении, что более качественной является та лопасть, на поверхности которой предельные линии тока близки к линиям тока «осесимметричного» потока. Его минимизация позволяет также выполнить одно из основных требований к лопастной

системе - отсутствие угла атаки при обтекании лопасти (совпадение линии растекания жидкости с линией входной кромки лопасти).

В § 5.5 описаны использовавшиеся в диссертации алгоритмы решения задачи оптимизации, проведено их методическое исследование. В пункте 5.5.1 сформулирована постановка задачи оптимизации:

найти

$$\min F(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in \mathbf{X} \quad (11)$$

при ограничениях

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x} : x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}\}, \quad (12)$$

$$\varphi_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad (13)$$

$$\varphi_k(\mathbf{x}) \leq 0, \quad k = m + 1, \dots, Q, \quad (14)$$

где \mathbf{x} – вектор параметров, определяющих геометрию лопасти, F – целевой функционал, (12) – фазовые, (13) – гидродинамические, и (14) – геометрические ограничения. В пункте 5.5.2 рассматривается детерминированный алгоритм решения поставленной оптимизационной задачи ПОИСК. В пункте 5.5.3 описывается, так называемый, генетический алгоритм поиска экстремума BGA, в основу которого положена теория естественного отбора Дарвина, согласно которой популяция индивидуумов меняется в течение нескольких поколений путем рекомбинации (скрещивания) и мутации отдельных индивидуумов, подчиняясь при этом законам естественного или искусственного отбора относительно предписанного критерия. Применительно к проектированию лопасти рабочего колеса гидротурбины, *индивидуумом* является рабочее колесо с лопастью какой-то конкретной формы или набор параметров $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$, определяющих эту лопасть. В пункте 5.5.4 проведен сравнительный анализ обоих алгоритмов решения оптимизационной задачи, показавший, что хоть

число оптимизационных шагов, необходимых для нахождения минимума функционала у алгоритма ПОИСК в большинстве случаев меньше, чем у BGA, последний более применим к задаче оптимизации лопасти. Так при сложном виде целевого функционала он с большей вероятностью осуществляет поиск глобального минимума.

В § 5.6 анализируются результаты оптимизационных расчетов радиально-осевого рабочего колеса гидротурбины Братской ГЭС. Минимизация функционала F_1 при ограничениях на напор и область кавитации дала уменьшение кинетической энергии потока в выходном сечении в полтора раза. В результате минимизации функционала F_2 площадь зоны кавитации уменьшилась с 5% до 1% от площади всей тыльной поверхности лопасти. При минимизации функционала F_3 удалось полностью устранить перетекание жидкости с рабочей стороны на тыльную в окрестности входной кромки и тем самым обеспечить нулевой угол атаки и снизить ударные потери в рабочем колесе (рис. 7-8).

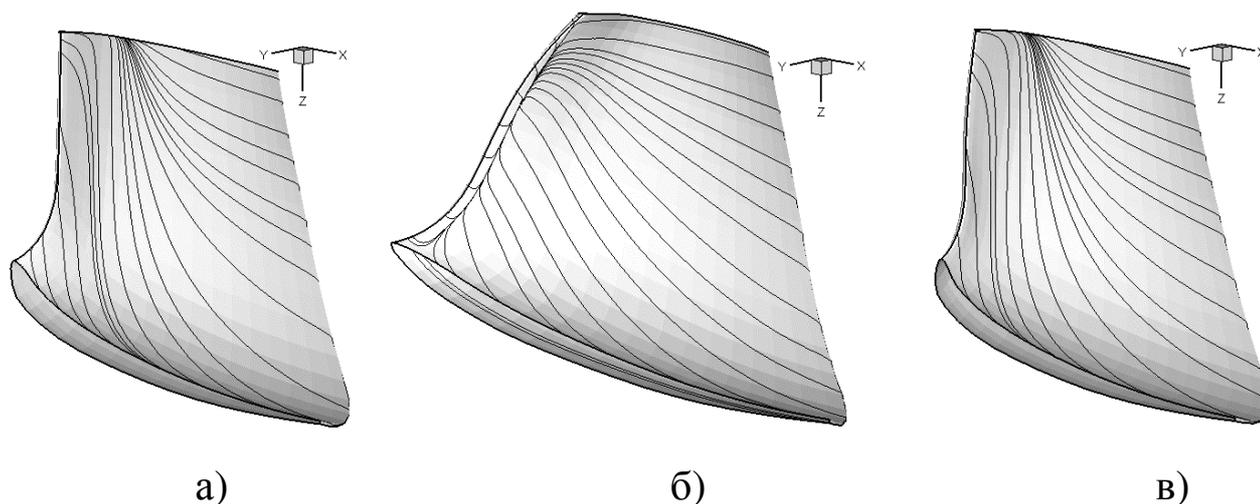


Рис. 7. Линии тока на рабочей стороне лопасти: а) - начальная, б) - оптимальная при $\sigma_0 = 1$, в) - оптимальная при $\sigma_0 = 10$

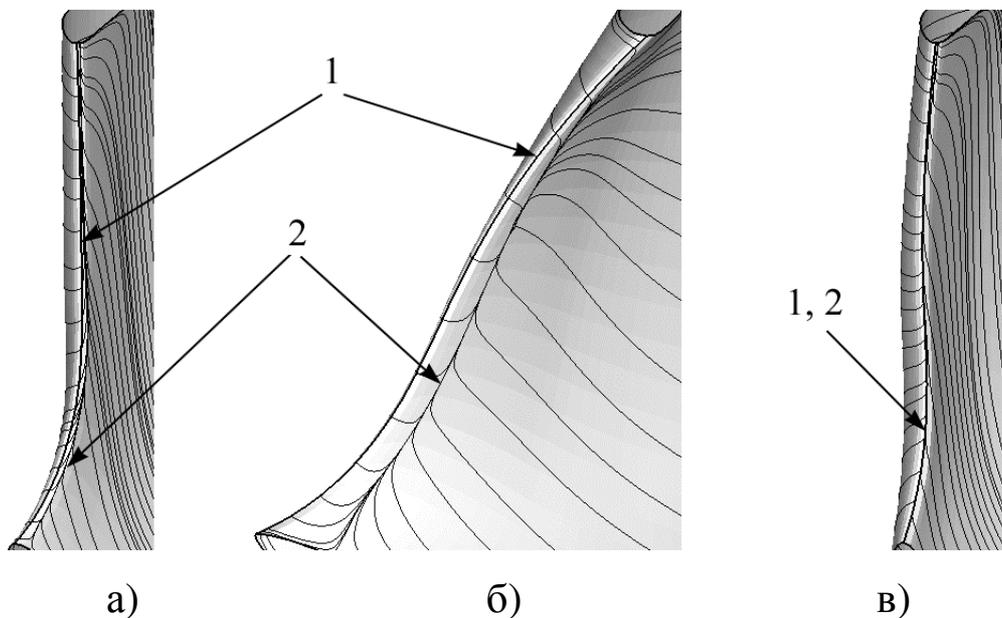


Рис. 8. Линии тока в окрестности входной кромки: а) - начальная, б) - оптимальная при $\sigma_0 = 1$, в) - оптимальная при $\sigma_0 = 10$, 1 – линия пересечения срединной поверхности и входной кромки лопасти, 2 - линия растекания

В §5.7 предлагается генетический алгоритм многоцелевой оптимизации, при которой одновременно минимизируются несколько целевых функционалов. Вследствие того, что минимизируемые функционалы независимы, не существует одного решения, дающего минимум сразу всех целевых функционалов. Решением такой задачи является целое семейство точек, называемое фронтом Парето. Каждая точка фронта Парето является оптимальной в том смысле, что путем ее возмущения невозможно улучшить какой-либо целевой функционал без ухудшения остальных. В предлагаемом алгоритме поиск фронта Парето основывается на понятии ранга индивидуума, характеризующем его расстояние до фронта Парето. Возможности построенного алгоритма получать качественные решения продемонстрирована на ряде тестовых задач с числом варьируемых переменных от 2 до 30 и двумя или тремя целевыми функционалами.

В § 5.8 алгоритм применяется для многоцелевой оптимизации формы лопасти РК Братской ГЭС. Как и в случае одноцелевой оптимизации,

расчеты течения в межлопастном канале рабочего колеса проводятся в рамках уравнений Эйлера. В качестве целевых функционалов рассматриваются кинетическая энергия на выходе из РК, размер области кавитации, отклонение потока в межлопастном канале от «осесимметричного» потока. Приводятся результаты оптимизации лопасти по двум и трем функционалам, показывающие работоспособность предложенного алгоритма многоцелевой оптимизации.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту. Они приведены в начале автореферата.

Список основных публикаций по теме диссертации

монография

1. Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скорospelов В.А., Шаров С.В. Численное моделирование течений в турбомашинах – Новосибирск: Наука, 2006.

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК для представления результатов докторских диссертаций

2. Лобарева И.Ф., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скорospelов В.А., Турук П.А. Многоцелевая оптимизация формы лопасти гидротурбины // *Вычислительные технологии* – 2006 – Т. 11, № 5 – С. 63-75.
3. Лобарева И.Ф., Скорospelов В.А., Турук П.А., Черный С.Г., Чирков Д.В. Об одном подходе к оптимизации формы лопасти гидротурбины // *Вычислительные технологии* – 2005 – Т. 10, № 6, – С. 52-73.
4. Кузьминов А.В., Лапин В.Н., Черный С.Г. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной k-ε - модели // *Вычислительные технологии* – 2001 – Т. 6, № 5, – С. 73-86.

5. Черный С. Г., Шашкин П.А., Грязин Ю.А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей // *Вычислительные технологии* – 1999 – Т.4, № 2 – С. 74-94.
6. Медведев А.А., Трусова Н.Н., Черный С.Г., Шаров С.В. Численное моделирование процесса отбора проб аэрозоля во входную трубку пробоотборника из воздушного потока // *Журнал прикладной механики и технической физики* – 1999 – Т. 40, №5, – С. 113-122.
7. Медведев А.А., Трусова Н.Н., Черный С.Г., Шаров С.В. Численное исследование аспирации аэрозольных частиц из потока в щелевой пробоотборник // *Оптика атмосферы и океана* – 1999 – Т. 12, №6, – С. 562-564.
8. Медведев А.А., Трусова Н.Н., Черный С.Г., Шаров С.В. Численное исследование аспирации аэрозольных частиц в тонкостенную трубку, ориентированную под прямым углом к потоку // *Оптика атмосферы и океана* – 1998, – Т. 11, № 9, – С. 1026-1030.
9. Грязин Ю.А., Черный С.Г., Шаров С.В., Шашкин П.А. Об одном методе численного решения трехмерных задач динамики несжимаемой жидкости // *Доклады академии наук* – 1997 – Т. 353, № 4 – С. 478-483.
10. Шаров С.В., Черный С.Г., Окулов В.Л., Грязин Ю.А. Выбор граничных условий в выходном сечении трубы при расчете закрученных течений // *Теплофизика и аэромеханика* – 1997 – Т.4, № 3, – С. 347-350.

публикации в международных рецензируемых журналах

11. Лапин В.Н., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Моделирование турбулентного течения в проточном тракте радиаль-

но-осевой гидротурбины // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling* – 2006 – V. 21, № 5 (в печати).

12. Cherny S., Chirkov D., Lapin V., Lobareva I., Sharov S., Skorospelov V. 3D Euler flow simulation in hydro turbines: unsteady analysis and automatic design // *Springer Series: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design* – 2006 – V. 93, – P. 33-51.
13. Комар И.Ф., Лапин В.Н., Скорospelов В.А., Черный С.Г., Чирков Д.В., Шаров С.В. Проблемы моделирования течений в турбомашинах // *Вестник КазНУ, серия математика, механика, информатика*, – 2005 – № 2, – С. 27-52.
14. Cherny S.G., Sharov S.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A. Methods for three-dimensional flows computation in hydraulic turbines // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling* – 2003 – V. 18, № 2, – P. 87-104.
15. Kovenya V., Cherny S., Sharov S., Karamyshev V., Lebedev A. On some approaches to solve CFD problems // *Computers&Fluids*, – 2001 – V. 30 – P. 903-916.
16. Karamyshev V.B., Kovenya V.M., Cherny S.G. Convergence acceleration in implicit methods for CFD problems // *Computational Fluid Dynamics Journal* – 1997 – V. 6, №2, – P. 157-166.

публикации в трудах международных конференций

17. Cherny S.G., Chirkov D.V., Lapin V.N., Sharov S.V., Skorospelov V.A., Pylev I.M. Unsteady flow computation in hydro turbines using Euler equations // *Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics, and Unsteady Aerodynamics*. Edited by V.A. Skibin, V.E. Saren, N.M. Savin, S.M. Frolov – TORUS PRESS Ltd. – 2006 – P. 356-369.

18. Skorospelov V.A., Turuk P.A., Aulchenko S.M., Latypov A.F., Nikulichev Yu.V., Lapin V.N., Chirkov D.V., Cherny S.G. Solution of the 3D optimization problem of the aerohydrodynamic shape of turbine components // Proceedings of XII-th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, 28 June - 3 July – 2004 – V. 2, p. 172-177.
19. Черный С.Г., Шаров С.В., Скорospelов В.А., Турук П.А., Пылев И.М., Кондратьев Ю.С. Численное моделирование течения в гидротурбинах с учетом взаимодействия между ротором и статором // Совм. вып. *Вычислительные технологии* – 2002 – Т.7 Ч. 4, *Вестник КазНУ* – 2002 – № 4 (32), по материалам Международной конференции ВТММ 2002 – С. 273-280.
20. Лапин В.Н., Скорospelов В.А., Турук П.А., Черный С.Г. Численное исследование влияния моделей жидкости и зазора между лопастями и корпусом рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины на особенности и характеристики течения // Совм. вып. *Вычислительные технологии* – 2002 – Т.7 Ч. 3, *Вестник КазНУ* – 2002 – № 4 (32), по материалам Международной конференции ВТММ 2002 – С. 181-191.
21. Скорospelов В.А., Турук П.А., Черный С.Г., Шаров С.В. Численное моделирование течения во всей проточной части гидротурбины // Труды международной конференции RDAMM-2001, Спец. Выпуск *Вычислительные технологии* – 2001 – Т. 6, № 4.2 – С. 570-584.
22. Cherny S., Gryazin Yu., Sharov S., Shashkin P. An efficient LU-TVD finite volume method for 3-D inviscid and viscous incompressible flow problems // Proceedings of the Third ECCOMAS Computational Fluid

Dynamics Conference, 9-13 Sept. 1996 Paris, France, John Wiley & Sons
– 1996 – P. 90-96.

23. Cherny S.G., Gryazin Yu.A., Shashkin P.A., Sharov S. V. An Efficient LU-TVD Finite Volume method for Incompressible 3-D Navier-Stokes Equations, based on Pseudo-compressible formulation // Proceedings of International Conference on the Methods of Aerophysical Research, September 2 - 6, 1996, Novosibirsk, – P. 73-78.