На правах рукописи Дееее

### Авдюшенко Александр Юрьевич

### НОВЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИКИ ТУРБОМАШИН

05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор <b>Черный Сергей Григорьевич</b>
Официальные оппоненты:	Белолипецкий Виктор Михайлович доктор физико-математических наук, профессор, Институт вычислительного моделирования СО РАН
	Курзин Владимир Борисович доктор физико-математических наук, профессор, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 29 апреля 2014 г. в 9:00 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ИВТ CO PAH: <br/> http://www.ict.nsc.ru/sitepage.php?PageID=17  $\,$ 

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики Государственной публичной научно-технической библиотеки Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 6.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к. ф.-м. н.

led

А.С. Лебедев

### Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований. Технологии новых и возобновляемых источников энергии включены в перечень критических технологий Российской Федерации<sup>1</sup>. В 2010 г. гидроэнергетика обеспечивала около 20% мирового конечного потребления энергии от возобновляемых источников, и этот процент неуклонно растет<sup>2</sup>.

В связи с этим исследование динамики вязкой несжимаемой жидкости в проточном тракте (ПТ) гидроэлектростанции (ГЭС) и её воздействия на элементы гидротурбины (ГТ) представляет значительный интерес. Как правило, лабораторные и натурные экспериментальные исследования сложны и дорогостоящи, поэтому задача построения эффективных численных моделей и изучения на их основе нестационарных турбулентных течений в ПТ ГЭС является актуальной. Создание численной модели подразумевает математическую формулировку задачи, разработку, обоснование и тестирование численных алгоритмов и их реализацию в виде комплекса программ.

Течения жидкости в ПТ ГЭС подразделяются на установившиеся и переходные. К установившимся относятся течения при неизменных значениях расхода жидкости, частоты вращения рабочего колеса (PK) и нагрузки на вал PK. Эти течения являются стационарными или периодически нестационарными и достаточно точно моделируются исследователями в настоящее время<sup>3,4,5</sup>.

Переходные течения возникают при переходе ГТ из одного фиксированного режима работы в другой, вызванном регулировкой открытия направляющего аппарата (НА) или изменением нагрузки на вал РК. Такие течения являются существенно нестационарными и характеризуются сильными колебаниями расхода во времени. Это приводит к динамическому изменению давления в проточном тракте, проявляющемуся в форме гидравлического удара. Моделирование таких течений актуально в связи с частыми изменениями мощности электросети (как суточными, так и в течение дня), приводящими к необходимости изменения режима работы ГЭС.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: Указ Президента Рос. Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 // Собр. законодательства Рос. Федерации. — 2011. — № 28. — Ст. 4168.

 $<sup>^2 {\</sup>rm Renewables}$ 2012 Global Status Report. — REN<br/>21, 2012. — Paris: REN<br/>21 Secretariat. — 176 p.

 $<sup>^3</sup>$ Черный, С.Г. Численное моделирование течений в турбомашинах / С.Г. Черный, Д.В. Чирков, В.Н. Лапин, В.А. Скороспелов, С.В. Шаров. — Новосибирск: Наука, 2006. — 202 с.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Смирнов, Е. М. Опыт численного анализа пространственных турбулентных течений в турбомашинах / Е. М. Смирнов, А. И. Кириллов, В. В. Рис // Научно-технические ведомости. — СПб.: СПбГПУ. — 2004. — № 2(36). — С. 55–70.

 $<sup>^5</sup>$ Ciocan, G. D. Experimental Study and Numerical Simulation of the FLINDT Draft Tube Rotating Vortex / G. D. Ciocan, M. S. Iliescu, T. C. Vu, B. Nennemann, F. Avellan // J. of Fluids Engineering. - 2007. - Vol. 129, No. 2. - P. 146–158.

До последнего времени для исследования переходных процессов в ГЭС использовалась одномерная гидроакустическая теория. Она основана на гиперболической системе уравнений сохранения массы и импульса для сжимаемой жидкости<sup>6,7,8</sup>. В рамках этого подхода водовод и элементы ГТ моделируются набором осесимметричных труб заданной геометрии, переменными являются скорость и давление жидкости. Существенным недостатком такого подхода является необходимость *априори* знать универсальную характеристику гидротурбины (УХ ГТ), используемую для задания условий на границах труб и коэффициентов уравнений. Сложная геометрия спиральной камеры, решеток статора, НА, РК и отсасывающей трубы (ОТ) представляется в таком подходе косвенно через УХ ГТ, также в нем невозможно учесть особенности трехмерного нестационарного турбулентного потока (вихри, рециркуляционные и кавитационные зоны).

В последние годы появляются работы, в которых переходные течения моделируются в трехмерных постановках с использованием пакетов программ FLUENT 6.3 и CFX 13.0, но явление гидроудара, оказывающее значительное влияние на поток, в этих работах не рассматривалось.

В настоящей работе для решения задачи моделирования течения при переходных режимах работы ГЭС предлагается оригинальная гибридная модель, в которой прохождение гидроудара в длинном водоводе описывается одномерной моделью упругого гидроудара, а течение в области турбины – в «жестком» приближении, но в аккуратной пространственной геометрической и гидродинамической постановке (рисунок 1).

Следующая проблема, рассмотренная в диссертации, связана с неизбежными зазорами между вращающимися (рабочее колесо) и неподвижными частями ГТ (рисунок 2), приводящими к протечкам жидкости и потерям энергии. Для снижения объёмных потерь в зазорах устанавливаются уплотнения. Кольца уплотнений крепятся на верхнем и нижнем ободах или на камере РК. Ступица РК имеет разгрузочные отверстия, расположенные за выходными кромками лопастей, через них полость над РК сообщается с основным проточным трактом.

Кроме уменьшения потерь мощности в ГТ за счёт ограничения величин протечек воды между вращающимися и неподвижными частями, уплотнения обеспечивают также снижение осевой и радиальной нагрузок (OPH), действующих на PK<sup>9</sup>. В настоящее время для предсказания OPH и потерь

 $<sup>^6</sup>$ Жмудь, А. Е. Гидравлический удар в гидротурбинных установках / А. Е. Жмудь. — Изд-во ГЭИ, 1953. — 235 с.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Кривченко, Г.И. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках / Г.И. Кривченко, Н. Н. Аршеневский, Е. Е. Квятковский, В. М. Клабуков. — Под ред. Г.И. Кривченко. — Москва: Энергия, 1975. — 368 с.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Nicolet, C. Unstable Operation of Francis Pump-Turbine at runaway: Rigid and Elastic Water Column Oscillation Modes / C. Nicolet, S. Alligne, B. Kawkabani, J.-J. Simond, F. Avellan. // J. of Fluid Machinery and Systems. - 2009. - Vol. 2, No. 4. - P. 324–333.

 $<sup>^9</sup> Грановский, С. А. Конструкции и расчет гидротурбин / С. А. Грановский, В. М. Малышев, В. М. Орго, Л. Г. Смоляров. — Л.: Машиностроение, 1974. — 408 с.$ 



ободом и камерой РК Рисунок 2 — Рабочее колесо с зазорами, полостями и разгрузочными отверстиями

Полость между

мощности в уплотнениях и полостях в основном используются приближённые инженерно-эмпирические методики, в которых сложная трехмерная конфигурация зазоров представлена грубо и не учитываются особенности трехмерного потока жидкости в ГТ. Поскольку величины зазоров и характерные размеры областей протечек на три порядка меньше характерных размеров РК, совместный расчет трехмерного течения во всей ГТ в полной постановке с учетом зазоров и областей протечек потребует большого объема вычислений и как следствие, приведет к абсолютно нереалистичным временам счета. Поэтому в диссертации разработан комбинированный метод моделирования трехмерных течений в полостях и уплотнениях, сопряженный с расчетом течения в основном ПТ ГТ посредством инженерноэмпирической методики.

Третьей задачей, поставленной и решенной в диссертационной работе, было создание численной модели течения в ГТ с кольцевым затвором. Для обеспечения надежности работы гидроэнергетического оборудования высоконапорных ГЭС, а также для повышения эффективности работы гидроаккумулирующих электростанций, работающих при больших циклических нагрузках, вместо предтурбинных дисковых или шаровых затворов устанавливают кольцевые затворы.

Одна из серьезных проблем, возникающих при эксплуатации кольцевого затвора – его заклинивание. Поэтому при его проектировании важным является учет осевых  $F_z$  и радиальных  $(F_x, F_y)$  сил, действующих на затвор со стороны нестационарного потока воды. От их величин зависит расчет мощности сервомоторов и принятие мер по предотвращению заклинивания затвора<sup>10</sup>. Важным является также расчет зависимости расхода от степени закрытия затвора. От него, в частности, зависит повышение давления в спиральной камере вследствие гидроудара.

Таким образом, несмотря на многолетние исследования, в моделировании течений в ПТ ГЭС указанные проблемы остаются недостаточно изученными. Не выяснено влияние гидроудара и изменения скорости вращения рабочего колеса на структуру потока. Недостаточно исследованы ОРН на РК и потери энергии, возникающие из-за протечек воды через зазоры между вращающимися и неподвижными частями гидротурбины, а также динамические нагрузки на элементы гидротурбины и характеристики нестационарного потока при наличии кольцевого затвора.

В связи с этим, разработка новых математических моделей течений в ПТ ГЭС, учитывающих такие особенности, актуальна как в научном, так и в практическом плане. Решение этой задачи позволит сформировать более полные представления о структуре исследуемого потока и возможностях того или иного метода изменения характера течения, повышения коэффициента полезного действия или улучшения прочностных качеств гидротурбины.

Цель исследования — создание новых численных моделей для адекватного описания течений при переходных режимах работы ГТ, в уплотнениях и полостях между вращающимися и неподвижными частями, при наличии нестандартных элементов (кольцевой затвор).

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Шевченко, Н. Г. Прогнозирование гидравлической силы воздействия потока воды на кольцевой затвор гидротурбины / Н. Г. Шевченко, Е. С. Коваль // Сборник научных трудов SWorld. Матер. межд. научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований'2013». — Выпуск 1. Том 6. — Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. — ЦИТ: 113-0282. — С. 19-22.

**Объектом исследований** являются методы моделирования течений в проточных частях гидротурбин при переходных режимах работы, в полостях и уплотнениях, при наличии кольцевого затвора.

**Предметом исследований** являются нестационарные процессы и особенности течений в гидротурбинах и методов их моделирования в новых постановках.

## Основные задачи, решенные в ходе достижения поставленной цели.

- Обобщен на подвижные сетки метод решения трехмерных уравнений Рейнольдса движения несжимаемой жидкости, замкнутых k – ε моделью турбулентности.
- 2. Разработан метод совместного решения
  - трехмерных уравнений Рейнольдса на подвижных сетках,
  - уравнения вращения рабочего колеса,
  - одномерных уравнений упругого гидроудара.
- 3. Предложена новая постановка для численного моделирования течений при переходных режимах работы гидротурбин.
- 4. Разработан метод моделирования течений в полостях и уплотнениях, сопряженный с методом моделирования течения в основном проточном тракте гидротурбины.
- 5. Создан метод расчета течения при наличии цилиндрического кольцевого затвора.
- 6. Создан программный комплекс, реализующий построенные численные алгоритмы на многопроцессорных вычислительных системах.
- 7. Проведены верификация и валидация разработанных численных моделей.
- 8. В новых постановках решены практически важные задачи определения динамических нагрузок на элементы гидротурбины в нестационарном потоке.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие четырем пунктам (1, 3, 4 и 5) паспорта специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по физикоматематическим наукам.

- 1. Новый математический метод моделирования течений при переходных режимах работы гидротурбин, объединяющий решение нестационарных трехмерных уравнений Рейнольдса на подвижных сетках, уравнения вращения рабочего колеса и одномерных уравнений упругого гидроудара. Новый метод моделирования течений воды через полости и уплотнения гидротурбин.
- 2. Численный метод решения уравнений Рейнольдса на подвижных сетках и численный метод совместного решения уравнений, описывающих переходные процессы в гидротурбинах, реализованные на многопроцессорных вычислительных системах с применением технологии MPI.

- 3. Программные комплексы CADRUN/2013 и CADRUN2/2013, предназначенные для расчетов нестационарных трехмерных турбулентных течений в гидротурбинах, созданные на основе предложенных методов и используемые для проведения вычислительных экспериментов в OAO «Силовые машины» «ЛМЗ» в г. Санкт-Петербурге.
- 4. Численные исследования течений в переходных режимах: пуска в турбинный режим, регулировки мощности и мгновенного сброса нагрузки. Основные закономерности формирования и развития структуры нестационарных турбулентных течений несжимаемой вязкой среды при обтекании подвижных лопаток НА и лопастей РК в переходных режимах работы радиально-осевых гидротурбин.
  - С использованием нового комбинированного метода:

• обнаружено влияние высоты верхней области протечки на течение в разгрузочном отверстии — при высоте менее 10 мм в разгрузочном отверстии формируется закрученное вихревое течение, гидравлическое сопротивление при этом увеличивается в 4 раза;

• найдено соотношение радиальных сил — при относительном эксцентриситете рабочего колеса  $\varepsilon > 0.6$  радиальные силы, действующие на лабиринтные уплотнения, дают более 50 % общей радиальной нагрузки, действующей на всё рабочее колесо гидротурбины.

Таким образом, в соответствии с формулой специальности 05.13.18 в диссертации представлены оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Научная новизна выносимых на защиту результатов заключается в следующем.

Впервые рассмотрена модель переходных процессов в проточной части ГЭС, одновременно учитывающая нестационарное трехмерное турбулентное течение несжимаемой жидкости в гидротурбине, движение лопаток НА, изменение скорости вращения РК и явление гидравлического удара в водоводе.

Предложен новый численный метод совместного решения нелинейных систем уравнений, образующих модель переходных процессов.

На основе разработанных эффективных численных методов создан оригинальный программный комплекс, допускающий использование в расчетах современных многопроцессорных систем.

Новым является разработанный комбинированный метод моделирования течений воды через полости и уплотнения гидротурбин, позволяющий определять величины протечек и осевых и радиальных нагрузок на рабочее колесо.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием в качестве основы моделирования фундаментальных законов механики жидкости и газа, динамики твердых тел и выбором теоретически обоснованных численных методов, а также подтверждается хорошим согласованием полученных численных результатов с экспериментальными данными и расчетными данными других исследователей.

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования полученных результатов в ряде прикладных областей наукоемкого машиностроения и электроэнергетики для моделирования течений жидкости в проточных частях различных типов гидротурбин или других аэрогидродинамических установках (программные комплексы CADRUN/2013 и CADRUN2/2013, зарегистрированные в Роспатенте 25 января 2013 г., рег. № 2013611576 и № 2013611580). Результаты диссертационной работы используются в исследованиях в ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в г. Санкт-Петербурге, что подтверждает приложенный в конце диссертации акт об использовании научных результатов в практической деятельности.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на объединенном научном семинаре ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии» под руководством академика РАН Ю.И. Шокина и проф. В.М. Ковени, на объединенном научном семинаре ИВМиМГ и ССКЦ СО РАН «Архитектура, системное и прикладное программное обеспечение кластерных суперкопьютеров» под руководством проф. Б. М. Глинского, на научном семинаре Института теплофизики СО РАН, а также на 11 всероссийских и международных конференциях: III Междунар. конф. «High Performance Computing 2013» (Киев, Украина, окт. 2013); Междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании ВИТ-2013» (Усть-Каменогорск, Казахстан, сент. 2013); XIII Всероссийская конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, окт. 2012); XI Всероссийская конф. «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, окт. 2012); XXVI Междунар. конф. «IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems» (Пекин, Китай, авг. 2012); Междунар. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию Н. Н. Яненко (Новосибирск, июнь 2011); XVII Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам «ВМСППС'2011» (Алушта, май 2011); XXV Междунар. конф. «IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems» (Тимишоара, Румыния, сент., 2010); VIII Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях «NPNJ'10» (Алушта, май 2010); XLVII Междунар. научная студенческая конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Математика (Новосибирск, апр. 2009); XLVI Междунар. научная студенческая конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Математика (Новосибирск, апр. 2008).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций в печатных листах, в знаменателе — объем принадлежащий лично автору), в том числе 4 статьи [1–4] (9.02/5.4) в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук, 8 публикаций в трудах международных конференций [5– 12] (5.47/2.9), 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте, 5 публикаций в тезисах международных и всероссийских конференций (0.14/0.1).

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Во всех работах [1–7, 9–12], опубликованных в соавторстве, постановка задач выполнена совместно; соискатель самостоятельно обобщил на подвижные сетки и реализовал в виде комплексов программ численный метод решения трехмерных уравнений Рейнольдса движения несжимаемой жидкости, разработал метод совместного решения уравнений Рейнольдса, уравнения вращения рабочего колеса и одномерных уравнений упругого гидроудара. Также автор непосредственно участвовал в разработке комбинированного метода моделирования течения в полостях и уплотнениях, сопряженного с методом моделирования течения в основном проточном тракте гидротурбины, и в создании метода расчета течения при наличии цилиндрического кольцевого затвора. Адаптация численных алгоритмов для работы на многопроцессорных системах, их верификация и валидация, анализ полученных результатов выполнены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста, включая 63 иллюстрации и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 88 наименований.

### Содержание диссертации

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения. Отмечены работы С. Г. Черного, Е. М. Смирнова, В. В. Риса, И. М. Пылева, А. В. Захарова, А. Ruprecht, Т. С. Vu, S. Kurosawa и др., посвященные численному моделированию установившихся течений в гидротурбинах. Проводится обзор подходов к построению упрощенных моделей неустановившегося движения рабочей жидкости в напорных трактах, представленных в работах Г. И. Кривченко, В. Б. Курзина, С. В. Алексеенко, П. А. Куйбина, В. Л. Окулова, Д. Н. Горелова и др.

Приведены основные результаты и положения выносимые на защиту. Также во введении представлены сведения о научной новизне, практической значимости, апробации результатов и основных публикациях. Затем кратко изложено содержание диссертации по главам.

В **Главе 1** строится численный метод расчета трехмерных турбулентных течений несжимаемой жидкости на подвижных структурированных сетках.

В разделе 1.1 приведены нестационарные трёхмерные уравнения Рейнольдса, записанные как в дифференциальной форме, так и в форме интегральных законов сохранения массы и количества движения для подвижного объема V(t). В случае интегрирования по контрольному объему V, зависящему от времени, согласно правилу Лейбница дифференцирования интеграла с переменными пределами, в уравнениях возникает дополнительное слагаемое  $\mathbf{R}^t \mathbf{Q} \mathbf{x}_t \cdot d\mathbf{S}$  и уравнения Рейнольдса принимают вид

$$\mathbf{R}^{t} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \mathbf{Q} dV + \oint_{\partial V(t)} \left( \mathbf{K} d\mathbf{S} - \mathbf{R}^{t} \mathbf{Q} \mathbf{x}_{t} \cdot d\mathbf{S} \right) = \int_{V(t)} \mathbf{F} dV, \tag{1}$$

где матрица  $\mathbf{R}^t = \text{diag}(0, 1, 1, 1)$ , вектор неизвестных  $\mathbf{Q} = (p, w_1, w_2, w_3)^T$  содержит давление  $p = p_c + 2k/3$  (где  $p_c$  — гидростатическое давление, деленное на плотность жидкости; k — кинетическая энергия турбулентности) и компоненты вектора скорости  $w_i$  в декартовой системе координат; вектор сил  $\mathbf{F} = (x_1\omega^2 + 2w_2\omega, x_2\omega^2 - 2w_1\omega, g)^T$ ,  $d\mathbf{S} = \mathbf{n}dS$ ; dS – элемент поверхности  $\partial V(t)$ ,  $\mathbf{n}$  – внешняя единичная нормаль к  $\partial V(t)$ ,  $\mathbf{x}_t$  – вектор скорости движения точки на  $\partial V(t)$ , матрица  $\mathbf{K}$  имеет структуру

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_1^2 + p - \tau_{11} & w_1 w_2 - \tau_{12} & w_1 w_3 - \tau_{13} \\ w_1 w_2 - \tau_{21} & w_2^2 + p - \tau_{22} & w_2 w_3 - \tau_{23} \\ w_1 w_3 - \tau_{31} & w_2 w_3 - \tau_{32} & w_3^2 + p - \tau_{33} \end{pmatrix}.$$
 (21)

Далее формулируется условие геометрической консервативности (УГК)

$$\frac{\partial}{\partial t}V(t) = \oint_{\partial V(t)} \mathbf{x}_t \cdot d\mathbf{S},\tag{3}$$

являющееся одним из главных при решении уравнений, записанных в криволинейных координатах, зависящих от времени. Если при дискретизации уравнений (1) не удовлетворить УГК (3), то на задаче с решением в виде постоянного однородного потока численный метод на подвижной сетке даст возмущенное, отличное от начальных данных решение.

В разделе 1.2 предлагается метод решения уравнений Рейнольдса на подвижных сетках, основанный на концепции искусственной сжимаемости, неявной конечно-объемной аппроксимации и приближенной *LU*факторизации линеаризованной системы разностных уравнений. Параллельно с проводимой дискретизацией уравнений рассматриваются известные подходы построения численных методов на подвижных сетках, представленные в работах J. G. Trulio, P. D. Thomas, I. Demirdzic, M. Peric, W. Shyy, M. Lesoinne, C. Farhat, B. Koobus, C. Forster, M. Engel, M. Griebel, H. O. Зайцева, H. A. Щура, К. H. Волкова и др. Отмечается, что предложенный в диссертации метод, в отличие от имеющихся в литературе, приводит к точному выполнению УГК (3) в трехмерном случае на дискретном уровне. Это достигается аккуратным разбиением всей расчетной области на каждом шаге по времени на непересекающиеся тетраэдры и аппроксимацией скоростей движения граней ячеек, специально согласованным с разбиениями способом. В разделе 1.3 обосновывается постановка краевых условий на подвижной твердой границе. В разделе 1.4 представлены уравнения стандартной  $k - \varepsilon$  модели турбулентности и их дискретизация на подвижных сетках.

В разделе 1.5 приводятся результаты решения двух модельных задач с подвижными границами: расчет однородного потока на подвижной сетке и движение кругового цилиндра в покоящемся однородном поле несжимаемой вязкой жидкости. Движение цилиндра задано посредством перемещения со временем его границы и нормально связанной с ней системы координат. Анализ результатов показал, что метод корректно воспроизводит все характеристики потока и может быть использован для моделирования течений в областях с подвижными границами в различных задачах вычислительной гидродинамики.

В разделе 1.6 строится алгоритм параллельной реализации разработанного численного метода на многопроцессорных вычислительных системах. Обосновывается использование геометрического распараллеливания, заключающегося в декомпозиции всей расчетной области на блоки, каждый из которых рассчитывается на отдельном ядре многопроцессорной вычислительной системы. Коммуникации между процессорами осуществляются с использованием стандарта MPI. Приводятся результаты распараллеливания расчёта в полной постановке, полученные на кластерах ИВЦ НГУ и ССКЦ. Из проведенных исследований следует, что при использовании 61 счетного ядра время решения задачи моделирования нестационарного трехмерного турбулентного течения во всей гидротурбине на сетке с общим количеством ячеек около 2.5 млн сокращается более чем в 15 раз и составляет от 1 до 2 дней, что вполне приемлемо для практического применения.

В Главе 2 для расчета течений в переходном режиме работы ГЭС предлагается оригинальная гибридная численная модель, объединяющая решение нестационарных уравнений Рейнольдса на подвижных сетках, уравнения вращения РК как твёрдого тела и одномерных уравнений распространения упругого гидроудара в водоводе.

В разделе 2.1 описаны проблемы, возникающие при моделировании переходных процессов в гидротурбинах. Во-первых, из-за резкого сужения или расширения сечения ПТ (закрытие или открытие НА) возникает динамическое изменение давления в ПТ, проявляющееся в форме гидравлического удара. Существующие трехмерные модели переходных течений в гидротурбинах его не учитывают. Во-вторых, становится переменным расход Q и требуется соответствующим образом корректировать краевые условия. В-третьих, изменение границ расчетной области приводит к необходимости построения численного метода решения трехмерных уравнений несжимаемой жидкости на подвижных сетках. Четвертой проблемой является изменение во времени скорости вращения РК, которая входит в свободные члены уравнений количества движения. Поэтому необходимо дополнить модель уравнением вращения РК под действием гидродинамического момента.

В разделе 2.2 приведена система уравнений гибридной модели переходных процессов. В неё входят уравнения Рейнольдса (1), замкнутые уравнениями  $k - \varepsilon$  модели турбулентности Кима-Чена на подвижных сетках. Также в модель входит уравнение вращения РК как твердого тела

$$I_z \frac{d\omega}{dt} = M(t) - M_{\rm ren}(t) - sgn(\omega)M_{\rm Tp}, \qquad (4)$$

где  $I_z$  – суммарный момент инерции РК и генератора, M – крутящий момент, обусловленный действием потока на РК,  $M_{\rm ren}$  – момент полезной нагрузки, приложенный к валу электрогенератора,  $M_{\rm rp}$  – результирующий момент трения в электромеханической системе. Ещё одна подсистема модели — это уравнения упругого гидроудара<sup>11</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{c^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial \xi} = 0\\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial m}{\partial \xi} = 0 \end{cases}, \ \xi \in [0, L], \tag{5}$$

где  $m(\xi, t) = p(\xi, t)/\rho g - z(\xi)$  – потенциальный напор,  $Q(\xi, t)$  – расход жидкости,  $S(\xi)$  – площадь сечения водовода, c – скорость распространения упругой волны удара, L – длина водовода. Скорость c определяется концентрацией нерастворимого газа в воде и упругостью стенок водовода.

В разделе 2.3 рассмотрены краевые условия, задаваемые в модели переходного течения. Во входном сечении водовода и на выходе из ОТ фиксируются значения полных энергий потока, что соответствует физике переходного процесса. Особое внимание уделено взаимообмену параметрами течения между одномерной областью водовода и трехмерной областью гидротурбины. На выходе из водовода задается значение давления, полученное из (1) и усреденное по входному сечению НА. На входе в НА задаются значение расхода  $Q_{BB, \ Gbbx}$ , полученное в ходе решения системы уравнений (5) в водоводе, и угол входа потока  $\delta_{sn} = const$ .

В разделе 2.4 представлена численная реализация разработанной гибридной модели. Уравнения каждой из подмоделей решаются эффективными устойчивыми численными методами и замыкаются корректными краевыми условиями. Метод численного решения уравнений Рейнольдса на подвижных сетках описан в главе 1, система уравнений упругого гидроудара (5) решается по неявной разностной схеме методом прогонки. На каждой внутренней итерации текущего момента времени происходит взаимообмен параметрами задачи между областями водовода, ГТ и РК. В результате получен программный инструментарий моделирования переходных трехмерных течений в гидротурбинах, обладающий большим запасом

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Кривченко, Г.И. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках / Г.И. Кривченко, Н.Н. Аршеневский, Е. Е. Квятковский, В. М. Клабуков. — Под ред. Г.И. Кривченко. — Москва: Энергия, 1975. — 368 с.



Рисунок 3 — Пуск в турбинный режим: законы изменения открытия HA  $a_0(t)$  в эксперименте (•) и в расчете (—) (*a*); рассчитанные (—) и экспериментально полученные (•) зависимости от времени скорости вращения PK ( $\delta$ ) и давления в центре входного сечения HA ( $\epsilon$ )

устойчивости и высокой разрешающей способностью. Он позволяет проводить вычисления за 1-2 дня на сетках, содержащих около 2.5 млн ячеек.

В разделе 2.5 приводятся результаты расчетов переходных процессов: пуска в турбинный режим, уменьшения мощности, мгновенного сброса нагрузки. На рисунке 3 приведено сравнение рассчитанных и экспериментально полученных скоростей вращения РК и давлений в центре входного сечения НА при переходном режиме пуска турбины с указанной зависимостью открытия НА от времени. Построенная модель правильно предсказывает величину гидроудара и изменение скорости вращения РК, возникающих при быстрых изменениях открытия НА. Её применение позволило проанализировать структуру потока в ПТ ГТ при указанных переходных режимах работы. На рисунке 4 показана эволюция давления перед НА и на стенке конуса ОТ в процессе уменьшения мощности. Снижение расхода при закрытии лопаток приводит к положительному гидроудару, который проявляется в повышении давления перед НА (рисунок 4, *a*). Зародышевый вихревой жгут, наблюдающийся в начальный момент времени в режиме оптимального КПД, по мере закрытия НА увеличивает свой размер и радиус винта (рисунок 5), что вызвано ростом остаточной закрутки за рабочим колесом. После окончания движения лопаток HA (т. е. при t > 12.5 с) течение имеет периодически нестационарный характер. В режиме неполной загрузки вращение вихревого жгута вызывает сильные пульсации расхода и момента сил на валу гидротурбины. Пульсации давления распространяются вверх по потоку в НА и водовод. Амплитуда пульсаций давления в конусе ОТ достигает A = 2.4% от напора, период прецессии жгута T = 1.41 с, что согласуется со значениями, измеренными в эксперименте:  $A_{\rm exp} = 2.3 \,\%$  и  $T_{\rm exp} = 1.3 \ {\rm c.}$ 

**Глава 3** посвящена построению метода моделирования течений в полостях и уплотнениях, сопряженному с методом моделирования течения в основном проточном тракте гидротурбины.



Рисунок 4 — Уменьшение мощности: зависимости давления от времени перед HA (a) и на стенке в конусе ОТ ( $\delta$ )



Рисунок 5 — Рост интенсивности вихревого жгута: показаны изоповерхности давления в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$ , отмеченные на рисунке 4,  $\delta$ 

В разделе 3.1 дана общая постановка задачи. Полная гидравлическая нагрузка **F**, действующая на PK, складывается из трёх составляющих:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3,\tag{6}$$

где  $\mathbf{F}_1$  — нагрузка от основного потока на поверхность проточной части PK,  $\mathbf{F}_2$  — нагрузка от течения через верхнюю область протечки,  $\mathbf{F}_3$  — нагрузка от течения через нижнюю область протечки (рисунок 6). В полной гидравлической нагрузке  $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$  выделяются осевые  $F_z$  и радиальные  $\mathbf{F}_R = (F_x, F_y)$  усилия. Сопряжение течений в зазорах и основном ПТ осуществляется через входные A, C и выходные B, D сечения областей



Рисунок 6 — Основной проточный тракт и области протечек за ступицей и ободом рабочего колеса гидротурбины

Рисунок 7 — Схема определения осевых и радиальных нагрузок на РК

протечек.

В разделе 3.2 приведен обзор существующих методик определения осевых и радиальных нагрузок на РК гидротурбины, вызванных течением воды в его межлопастных каналах, а также протечками в лабиринтных уплотнениях (ЛУ), полостях и разгрузочных отверстиях. Отмечено, что для простых геометрий приближенные инженерно-эмпирические методики дают приемлемые результаты при минимальных вычислительных затратах.

В разделе 3.3 строится комбинированный метод определения нестационарных осевых и радиальных нагрузок на рабочее колесо (рисунок 7). Из расчета течения в основной проточной части находятся давления в точках A, B, C, D, которые вместе с инженерно-эмпирическими формулами входных и выходных потерь энергии дают входные в точках A, C и выходные в точках B, D (см. рисунок 7) данные для последующих расчетов течений в верхних и нижних областях протечек.

В разделе 3.4 усовершенствована инженерно-эмпирическая методика<sup>12</sup> для расчёта радиальных нагрузок, действующих на ЛУ вследствие смещения оси вращения ротора. В модификации учтены влияние вращения ротора на коэффициент сопротивления узкой части лабиринта, сопротивление ячеек расширения, зависимость коэффициента сопротивления узкой части и ячеек расширения от переменного зазора между статором и ротором. Это позволило получить количественное соответствие результатов расчетов по модифицированной методике с расчетом по трехмерной модели течения

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Бедчер, Ф.С. Определение критического числа оборотов ротора насоса с учетом сил, возникающих в уплотнениях / Ф.С. Бедчер, А.А. Ломакин // М.-Л.: Паро- и газотурбостроение. Машгиз. — 1957. — с. 249–269. (Труды ЛМЗ, вып. 5)

жидкости в ЛУ.

В разделе 3.5 представлены результаты расчётов осевых и радиальных нагрузок на РК по предложенной методике. Показано, что при относительном эксцентриситете  $\varepsilon < 0.5$  прецессия ротора не оказывает заметного влияния на модуль радиальной силы. Влияние прецессии растет по мере увеличения эксцентриситета. Так, при  $\varepsilon = 0.9$  в случае  $\Omega = \omega$  радиальная сила на 30% больше, чем в случае простой несоосности ротора и статора. Показано, что при  $\varepsilon > 0.6$  радиальные силы, действующие на ЛУ, дают более 50% итоговой радиальной нагрузки, действующей на всё РК гидротурбины.

В **Главе 4** строится численная модель течения воды в гидротурбине с кольцевым затвором.

В разделе 4.1 приведена постановка задачи. Выделена особенность геометрии спиральной камеры — «зуб», приводящая к сильной окружной неравномерности потока. Затвор, перекрывающий ПТ ГТ, задается как твердая стенка в выходном сечении статора (модель тонкого затвора). В этом случае не учитывается форма оголовка затвора и область течения под ним. Другой подход задания затвора заключается в добавлении нового элемента ПТ — кольцевой области между оголовком затвора и нижней крышкой НА. В таком случае область течения под затвором моделируется точно.

В разделе 4.2 представлены численные реализации обеих моделей кольцевого затвора: бесконечно тонкого и затвора реальной толщины. Для реализации второй модели в программный комплекс добавлены процедуры построения сеток в новой области под затвором и передачи данных из нее в каналы статора и НА.

В разделе 4.3 описаны входные и выходные условия. Неизвестная априори зависимость расхода от степени закрытия затвора рассчитывается в экономичной циклической постановке, в которой расчетная область состоит из одного канала статора, одного межлопаточного и одного межлопастного канала. На входе и выходе из расчетной области фиксировались полные энергии потока. В расчетах в полной постановке, содержащей все каналы элементов ГТ, задавался расход, полученный в циклической постановке.

В разделе 4.4 представлены зависимости выталкивающей силы  $F_z$  и расхода от степени закрытия затвора *s*. Отмечено, что при  $s \ge 0.9$  в модели затвора реальной толщины выталкивающая сила становится отрицательной, т.е. затвор втягивается в проточную часть.

В разделе 4.5 приведены результаты расчета крутящих моментов лопаток НА и радиальных сил  $(F_x, F_y)$ , действующих на затвор. Показано, что амплитуды пульсаций сил резко возрастают при  $s \ge 0.7$ . Обнаружено сильное влияние окружной неравномерности потока, вызванной «зубом» спиральной камеры, на моменты лопаток НА, расположенных в окрестности «зуба», при небольших степенях закрытия затвора. При  $s \ge 0.7$  влияние

«зуба» на моменты исчезает.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

- 1. Разработан численный метод решения нестационарных трехмерных уравнений Рейнольдса на подвижных сетках. Предложен подход, обеспечивающий точное выполнение условия геометрической консервативности на дискретном уровне. Построенный метод применен для решения модельных и практических задач.
- 2. Построена гибридная модель течения при переходных режимах работы гидротурбин, одновременно учитывающая явление гидроудара, переменную частоту вращения РК и меняющийся расход воды, проходящей через водовод и гидротурбину. Представлены результаты расчетов процессов пуска турбины в рабочий режим, уменьшения мощности и мгновенного сброса нагрузки. Исследованы структуры и особенности трехмерных течений при переходных режимах работы ГТ: развитие прецессирующего вихревого жгута за РК при уменьшении мощности; срыв вихря с входной кромки лопасти РК и насосный вихрь, возникающие при пуске турбины.
- 3. Разработан комбинированный метод определения нестационарных осевых и радиальных нагрузок (ОРН) на рабочее колесо, основанный на расчетах трехмерного течения несжимаемой жидкости в основной проточной части и в областях протечек гидротурбины, позволяющий рассчитывать осевые и радиальные нагрузки, вызванные следующими факторами: неравномерностью потока в спиральной камере и статоре, ротор-статор взаимодействием, влиянием вверх по потоку нестационарности в конусе ОТ (вихревой жгут), несоосностью статора и ротора, изгибом вала ротора. Кроме того, метод позволяет рассчитывать расход жидкости через зазоры между вращающимися и неподвижными частями гидротурбины. Потери давления в лабиринтных уплотнениях, щелях и разгрузочных отверстиях вычисляются непосредственно с использованием турбулентной модели, тем самым не требуется эмпирическая информация о гидравлических сопротивлениях этих элементов.
- 4. Усовершенствована инженерно-эмпирическая методика для расчета радиальных нагрузок, действующих на лабиринтное уплотнение вследствие смещения оси вращения ротора. В предложенной методике учтены влияние вращения ротора на коэффициент сопротивления узкой части лабиринта, сопротивление ячеек расширения, зависимость коэффициента сопротивления узкой части и ячеек расширения от переменного зазора между статором и ротором. Результаты расчетов радиальной силы по усовершенствованной методике хорошо совпадают с результатами трехмерных расчетов течения во всем ЛУ для рассмотренного диапазона значений относительного эксцентриситета  $\varepsilon$  от 0 до 1, что позволяет рекомендовать ее для оценки

возникающих радиальных сил при проектировании геометрии областей протечек.

- 5. Создан метод расчета течения при наличии цилиндрического кольцевого затвора. С его помощью решены практически важные задачи определения динамических нагрузок на элементы гидротурбины и давлений в нестационарном потоке.
- 6. Проведены верификация и валидация разработанных методов. Создан программный комплекс, реализующий построенные численные алгоритмы на многопроцессорных вычислительных системах. Результаты расчетов, выполненных с помощью разработанного программного комплекса, используются в проектных исследованиях филиала ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в г. Санкт-Петербурге.

В приложении А приведены матрицы Якоби невязкого и вязкого потоков, матрицы правых собственных векторов, а также *RDL*-разложение матрицы Якоби невязкого потока. В приложении В представлены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акт об использовании научных результатов диссертационной работы в филиале ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в г. Санкт-Петербурге.

### Список основных публикаций по теме диссертации

#### Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

- Авдюшенко, А.Ю. Численный алгоритм моделирования пространственных течений несжимаемой жидкости на подвижных сетках / А.Ю. Авдюшенко, С.Г. Черный, Д.В. Чирков // Вычислительные технологии. — 2012. — Т. 17, № 6. — С. 3-25.
- 2. Бабаченко, Ю.В. Расчетное исследование радиальных сил, действующих на ротор радиально-осевой гидротурбины / Ю.В. Бабаченко, А.Ю. Авдюшенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4(2). С. 547-552.
- Авдюшенко, А.Ю. Численное моделирование переходных процессов в гидротурбинах / А.Ю. Авдюшенко, С.Г. Черный, Д.В. Чирков, В.А. Скороспелов, П.А. Турук // Теплофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 5. — С. 587-604.
- Авдюшенко, А. Ю. Метод расчета осевых и радиальных нагрузок на рабочее колесо гидротурбины в нестационарном потоке / А. Ю. Авдюшенко, С. Г. Черный, Д. В. Чирков // Вычислительные технологии. — 2013. — Т. 18., № 4. — С. 3-25.

# Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

 Avdyushenko, A. Yu. High-perfomance computations in problems of simulation and optimization of turbine hydrodynamics / A. Yu. Avdyushenko, A.S. Astrakova, A.E. Lyutov, S.G. Cherny, D. V. Chirkov // Proc. of Third International Conference High Performance Computing (HPC-UA 2013). — Ukraine, Kiev, 2013. P. 28-35. — http://hpc-ua.org/hpc-ua-13/files/proceedings/5.pdf

- Черный, С. Г. Численная модель течения в гидротурбине с затвором / С. Г. Черный, А. Ю. Авдюшенко, Д. В. Чирков // Совместный выпуск журналов «Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева» и «Вычислительные технологии». — Усть-Каменогорск, Казахстан, 2013. — С. 266-274.
- Авдюшенко, А.Ю. Метод численного моделирования переходных процессов в гидротурбинах / А.Ю. Авдюшенко, С.Г. Черный // Матер. XIII всероссийской конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. — Новосибирск, 2012. — http://conf.nsc.ru/files/conferences/ym2012/fulltext/137843 /139439/Large thesis Avd.pdf
- Авдюшенко, А.Ю. Численное моделирование переходного процесса пуска гидротурбины в турбинный режим / А.Ю. Авдюшенко // Матер. XI всероссийской конф. «Краевые задачи и мат. моделирование». — Новокузнецк, 2012. — С. 7-16.
- Chirkov, D. CFD simulation of pressure and discharge surge in Francis turbine at off-design conditions / D. Chirkov, A. Avdyushenko, L. Panov, D. Bannikov, S. Cherny, V. Skorospelov, I. Pylev // Proc. of 26th IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems. Beijing, China, 2012. http://iopscience.iop.org/1755-1315/15/3/032038/pdf/1755-1315\_15\_3\_032038.pdf
- 10. Черный, С.Г. Численное решение сопряженных задач «гидродинамика-упругость» / С.Г. Черный, Д.В. Чирков, В.Н. Лапин, Д.В. Банников, Д.В. Есипов, Д.С. Куранаков, А.Ю. Авдюшенко, В.А. Скороспелов, П.А. Турук // Матер. XVII междунар. конф. по выч. механике и современным прикладным программным системам (ВМ-СППС'2011). — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. — С. 169-171.
- Cherny, S. 3D Numerical simulation of transient processes in hydraulic turbines / S. Cherny, D. Chirkov, D. Bannikov, V. Lapin, V. Skorospelov, I. Eshkunova, A. Avdushenko // Proc. of 25th IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems. — Timisoara, Romania, 2010. — http://iopscience.iop.org/1755-1315/12/1/012071/pdf/1755-1315\_12\_1\_012071.pdf
- 12. Черный, С.Г. Численное моделирование нестационарных пространственных течений в каналах решеток гидротурбин / С.Г. Черный, Д.В. Чирков, В. Н. Лапин, И.Ф. Ешкунова, Д. В. Банников, А. Ю. Авдюшенко, В. А. Скороспелов, П. А. Турук // Матер. VIII междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ<sup>4</sup>10). — М: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — С. 72-75.