

На правах рукописи



Семенова Александра Владимировна

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАСТНОЙ  
СИСТЕМЫ РАБОЧЕГО КОЛЕСА  
ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

Специальность 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент,  
**Жарковский Александр Аркадьевич**

**Официальные оппоненты:** **Куйбин Павел Анатольевич**  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск, ученый секретарь.

**Ломакин Владимир Олегович**  
кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Москва, кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», доцент.

**Ведущая организация:** ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «15» декабря 2015 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенного по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главный учебный корпус, аудитория 118

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<http://www.spbstu.ru/>)

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015г.

Ученый секретарь



Хрусталеv Борис Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** обусловлена необходимостью проектирования лопастных систем рабочих колес (РК) поворотно-лопастной (ПЛ) гидротурбины, обеспечивающих высокие энергетические и кавитационные качества и надежную работу гидротурбин в широком диапазоне расходов и напоров. Гидродинамические характеристики гидротурбины взаимосвязаны между собой и необходимость одновременного улучшения энергетических и кавитационных качеств РК предъявляет противоречивые требования к геометрическим параметрам, отвечающим за форму лопасти. Данное противоречие и высокий уровень конкуренции на рынке гидроэнергетического оборудования приводят к тому, что в настоящее время необходимый технический уровень гидротурбин не может быть достигнут традиционным методом проектирования ограниченного числа вариантов и выбора наилучшего. Развитие вычислительной техники, достижения в изучении рабочего процесса и вычислительной гидродинамики позволяют осуществить новую методологию проектирования гидротурбин с применением методов математической оптимизации.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка методики многоцелевого многорежимного оптимизационного проектирования лопастной системы рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины с использованием генетического метода оптимизации в программном комплексе «CADRUN-opt», позволяющей проектировать рабочие колеса с высокими энергетическими и кавитационными качествами.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- анализ особенностей проектирования лопастей ПЛ гидротурбин;
- выбор, адаптация и верификация метода гидродинамического расчета;
- выбор режимов проектирования;
- разработка метода оценки кавитационных качеств РК;
- разработка целевых функций и ограничений;
- применение разработанной методики для проектирования лопастей ПЛ гидротурбин разной быстроходности.

**Объект исследования:** Геометрия лопастной системы РК ПЛ гидротурбины.

**Методы исследования:** При решении задач гидродинамики используются методы математического моделирования 3-х мерного вязкого течения, для решения оптимизационных задач используются методы отыскания экстремальных значений функций. В качестве основного метода исследования применялся численный эксперимент. Для верификации результатов численных экспериментов, проведенных в представленной работе, использовался метод сравнения с экспериментальными данными.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- предложена постановка задачи оптимизационного проектирования лопасти РК ПЛ гидротурбины с учетом особенностей рабочего процесса ПЛ гидротурбины;
- уточнена и адаптирована комбинированная методика расчета потерь в ПЛ гидротурбинах. Уточненная методика принята в качестве математической модели для расчета течения и потерь при решении оптимизационной задачи;

- предложен метод оценки кавитационных качеств РК, основанный на анализе распределения давления на лопасти в некавитационном потоке;
- предложена целевая функция для оценки кавитационных качеств РК;
- предложен способ модификации целевых функций для оценки работы гидротурбины на форсированном режиме;
- предложено ограничение на минимальный КПД гидротурбины, позволившее ускорить поиск оптимального решения;
- разработана методика оптимизационного проектирования лопасти РК ПЛ гидротурбины.

**Практическая значимость диссертационной работы:** Разработана методика оптимизационного проектирования лопасти рабочего колеса ПЛ гидротурбин, позволяющая проектировать гидротурбины с высоким средневзвешенным КПД и улучшенными кавитационными качествами. Разработанная методика заложена в модуль оптимизационного проектирования ПЛ гидротурбин. Оптимизационный программный комплекс «CADRUN-opt», предназначенный для оптимизации лопастных систем гидротурбин и разрабатываемый в СКБ ГТМ ОАО «Силовые машины» - «ЛМЗ» совместно с Институтом математики и Институтом вычислительных технологий Сибирского отделения российской академии наук, дополнен модулем оптимизационного проектирования ПЛ гидротурбин.

**Достоверность результатов:** Результаты представленных в работе верификационных расчетов согласуются с экспериментальными данными, полученными в Лаборатории водяных турбин ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» и в гидравлической лаборатории Турбоинститута г. Любляна, Словения.

**Личный вклад соискателя.** В научных публикациях, которые раскрывают основные результаты работы, автору принадлежат: разработка методики многоцелевого оптимизационного проектирования лопасти РК ПЛ гидротурбины, адаптация комбинированной методики расчета потерь к построению пропеллерных характеристик ПЛ гидротурбины, разработка метода оценки кавитационных качеств РК, формулировка целевых функций для оценки гидравлических и кавитационных качеств РК ПЛ гидротурбины, модификация целевых функций для форсированного режима, введение ограничения на минимальный КПД турбины, применение разработанной методики к проектированию лопастей РК ПЛ гидротурбин разной быстроходности.

**На защиту выносятся** следующие результаты:

- методика оптимизационного проектирования лопасти РК ПЛ гидротурбины;
- комбинированная методика расчета потерь для прогнозирования энергетических показателей, адаптированная к особенностям рабочего процесса ПЛ гидротурбин;
- метод оценки кавитационных качеств РК ПЛ гидротурбины, основанный на распределении давления в некавитационном потоке;
- способ модификации целевых функций для форсированного режима;
- ограничение на минимальный уровень КПД при оптимизационном расчете;
- результаты применения разработанной методики к проектированию РК ПЛ гидротурбин разной быстроходности.

**Апробация работы.** Основные научные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах: 15-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана 2011г), международной научно-технической

конференции «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития» (Санкт-Петербург, СПбГПУ 2012г), 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Beijing, China, 2012), Hydro Vision Russia 2013 (Москва 2013г), 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Montreal, Canada, 2014), Hydro 2014 (Черноббио, Италия 2014г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 2 работы опубликованы в зарубежных научных журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 142 страницах текста, включая 98 рисунков и 4 таблицы, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 73 наименования, и 1 приложения.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность разработки методики проектирования лопастной системы РК ПЛ гидротурбины с применением методов математической оптимизации. Сформулированы цели и задачи работы.

**В первой главе** выполнен анализ существующих подходов к проектированию РК гидротурбины. Рассмотрены традиционные инженерные подходы к проектированию лопастных систем и подходы с использованием методов математической оптимизации.

Традиционные инженерные подходы к проектированию лопастных систем, развитые А.Ю. Колтоном, Г.М. Моргуновым, Б.С. Раухманом, Г.И. Топажем, И.Э. Этинбергом и др., позволяют рассмотреть ограниченное число вариантов и зависят от опыта проектировщика.

Подходы к проектированию лопастных систем гидротурбин с использованием методов математической оптимизации впервые были развиты в работах Л.Я. Казачкова, В.И. Климовича, Г.И. Топажа, А.В. Федорова. К середине 80-х годов была поставлена и решена задача оптимизации, позволяющая максимизировать КПД гидротурбины на выбранном (как правило, оптимальном) режиме при заданных ограничениях (одноцелевая оптимизация). Оптимизационная задача решалась с использованием одномерных или двумерных методов расчета течения. Дальнейшее внедрение оптимизационных методов проектирования сдерживалось низким быстродействием вычислительной техники того времени.

Современное развитие вычислительной техники и 3-х мерных методов гидродинамического расчета позволяют разработать и довести до инженерного использования методику оптимизационного проектирования, основанную на автоматизированном переборе множества различных вариантов геометрий лопасти РК и выборе наилучшего. Выбор осуществляется по заданным критериям (целевым функциям). Для расчета целевых функций для каждого варианта геометрии решается прямая гидродинамическая задача. Автоматизированный перебор направляется выбранным оптимизационным алгоритмом. Современные методы оптимизационного поиска позволяют решать задачи с несколькими целевыми функциями (многоцелевая оптимизация). Предлагаемая методика основана на совместном решении гидродинамической и оптимизационной задач.

Проводится обзор работ, посвященных развитию методов многоцелевой оптимизации лопастных систем гидротурбин с использованием генетического

алгоритма. Эта тема развивалась в работах Д.В. Банникова, А.А. Сотникова, С.Г. Черного, Д.В. Чиркова, L. Ferrando, S. Kurosawa, F. Mazzouji, L. Tomas, E. Flores, A. Lipej, A. Skotak, J. Obrovsky и др. Отмечено, что в большинстве работ методы математической оптимизации применены к проектированию лопастной системы радиально-осевой (РО) гидротурбины. В качестве целевых функций принимаются потери в гидротурбине и площадь области кавитации на тыльной поверхности лопасти, оцененная по распределению давления в некавитационном потоке. В ряде работ предложено учитывать не только площадь зоны кавитации, но и ее местоположение на тыльной поверхности лопасти путем введения специально подбираемой весовой функции.

В работе выявлено, что ПЛ гидротурбины имеют ряд особенностей, затрудняющих применение методов оптимизационного проектирования, разработанных для РО турбин.

Во-первых, ПЛ гидротурбина – турбина двойного регулирования, т.е. регулирование расхода происходит не только путем изменения открытия направляющего аппарата (НА), но и путем изменения угла установки лопасти. Благодаря этому обеспечивается эффективная работа гидротурбины в широком диапазоне расходов и напоров. Для повышения средневзвешенного КПД лопастной системы проектирование необходимо проводить с учетом анализа работы гидротурбины на нескольких, по крайней мере, двух режимах работы: режиме оптимального КПД и форсированном режиме. Одним из факторов, оказывающих значительное влияние на рабочий процесс гидромашины, является кавитация. Проектирование с учетом форсированного режима работы гидротурбины позволяет улучшить кавитационные качества лопастной системы.

Во-вторых, ПЛ турбина – быстроходная турбина. Это накладывает высокие требования на точность расчета энергетических характеристик при проектировании. В некоторых работах по оптимизации ПЛ гидротурбин при оптимизации формы РК течение в отсасывающей трубе (ОТ) не рассчитывалось в предположении, что в точках комбинаторной зависимости потери в ОТ малы, не зависят от формы РК и могут быть оценены эмпирическими методами. В работе показано, что для точного прогнозирования потерь энергии в турбине и положения оптимума КПД на универсальной характеристике необходимо проводить гидродинамический расчет трехмерного вязкого течения, включающий расчет течения в ОТ.

Следующей отличительной особенностью ПЛ гидротурбин является наличие зазоров «лопасть – втулка», «лопасть – камера», которые существенно влияют на профиль скорости на входе в ОТ и, соответственно, потери в ней. Исходя из этого, рассчитывать энергетические характеристики при проектировании ПЛ гидротурбин необходимо с учетом вышеуказанных зазоров.

С учетом выявленных особенностей ПЛ гидротурбин выполнена постановка задачи оптимизационного проектирования лопастной системы РК ПЛ гидротурбины.

**Во второй главе** проведен выбор и верификация метода определения характеристик гидротурбин. Для этого рассмотрены методики расчета потерь и кавитационных характеристик гидротурбины.

В СКБ ГТМ ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» используется три основных методики расчета потерь. При использовании расчетно-экспериментальной методики (РЭМ) потери определяются по инженерным формулам, течение рассчитывается только для области «НА-РК» с использованием уравнений Эйлера. При

использовании расчетно-теоретической методики (РТМ) потери в гидротурбине определяются непосредственно из гидродинамического расчета. Моделирование потока проводится для всех элементов проточного тракта в трехмерной постановке с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. В программном комплексе «CADRUN-opt» используется комбинированная методика расчета (КМ) потерь. Суть этой методики в том, что потери в наиболее важных элементах проточной части определяются непосредственно при трехмерном моделировании турбулентного потока с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и соответствующей модели турбулентности. Потери в оставшихся элементах проточной части рассчитываются по инженерным формулам РЭМ, не требующей проведения гидродинамического расчета течения в этих элементах. Выбор элементов, потери в которых рассчитываются по формулам РЭМ во многом определяется быстроходностью турбины. Потери в спирали и статоре хорошо оцениваются по инженерным формулам и для РО и для ПЛ гидротурбин. Кроме того, эти потери не зависят от формы РК и могут быть оценены до оптимизационных расчетов. При адаптации комбинированной методики расчета потерь к особенностям ПЛ гидротурбин рассмотрен вопрос о необходимости включения в расчетную область ОТ и зазоров «лопасть – втулка», «лопасть – камера». Для этого были выполнены расчеты в следующих постановках:

АК (аппарат-колесо) без зазоров – расчет течения проводится в области «НА – РК», потери в спиральной камере, статоре и ОТ определяются по формулам РЭМ, зазоры «лопасть-камера» «лопасть-втулка» не включены в расчетную область.

АК (аппарат-колесо) с зазорами – расчет течения проводится в области «НА – РК», потери в спиральной камере, статоре и ОТ определяются по формулам РЭМ, зазоры «лопасть-камера» «лопасть-втулка» включены в расчетную область.

АКО (аппарат-колесо-отсасывающая труба) без зазоров – расчет течения проводится в области «НА – РК – ОТ», потери в спиральной камере и статоре определяются по формулам РЭМ, зазоры «лопасть-камера» «лопасть-втулка» не включены в расчетную область.

АКО (аппарат-колесо-отсасывающая труба) с зазорами расчет течения проводится в области «НА – РК – ОТ», потери в спиральной камере и статоре определяются по формулам РЭМ, зазоры «лопасть-камера», «лопасть-втулка» включены в расчетную область.

Показано, что хорошее совпадение расчетных данных с экспериментом достигается только в постановке «АКО с зазорами» (рис 1). Именно эта постановка принята в качестве гидродинамического метода расчета течения и потерь при оптимизационном проектировании РК ПЛ гидротурбин.

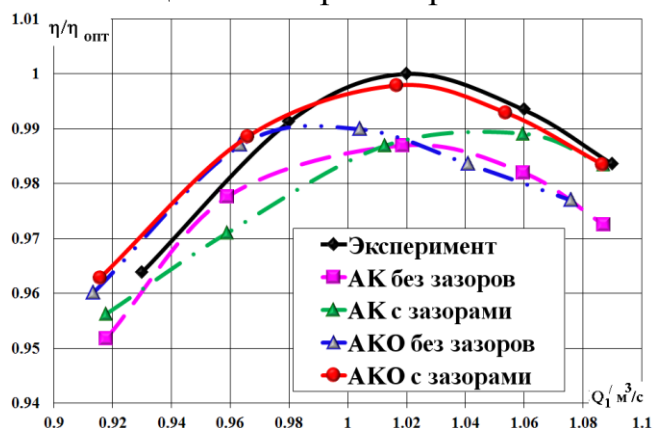


Рис.1 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_1' = \text{const}$

Описан численный метод решения гидродинамической задачи. Трехмерные

расчеты проводятся в стационарной циклической постановке. Расчетная область «АКО с зазорами». Течение в турбине описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса, замкнутыми стандартной  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности. Для передачи данных на границах расчетных областей «НА – РК» и «РК – ОТ» выполняется осреднение всех параметров потока по окружному направлению. Численный алгоритм решения уравнений движения основывается на неявном методе искусственной сжимаемости.

Расчет проводится для приведенной турбины с диаметром  $D_I=1\text{м}$  и напором  $H=1\text{м}$ . На входе в НА задается полная энергия потока:

$$E_{\text{вх}}=H - h_{\text{сп}} \quad (1)$$

где  $h_{\text{сп}}$  – потери в спирали и статоре, оцененные для каждого из режимов по инженерным формулам. На выходе из ОТ задается энергия  $E_{\text{вых}}=0$  и закон изменения давления. Таким образом, в ходе гидродинамического расчета остается фиксированным напор на турбине  $H=1\text{м}$ , а расход  $Q$  заранее не известен и определяется в ходе решения задачи.

Описаны существующие подходы к численному моделированию кавитационных течений на основе уравнений Навье-Стокса: метод выделения границы жидкость-пар и метод разрешения границы жидкость-пар. Отмечено, что непосредственное определение критического кавитационного коэффициента турбины данными методами требует серии прямых расчетов с разными значениями кавитационного коэффициента. Обычно, для построения срывной кавитационной характеристики необходимо провести от 8 до 12 гидродинамических расчетов. В рамках решения оптимизационной задачи это не приемлемо.

Для оценки кавитационных качеств лопастной системы предложен подход, основанный на анализе распределения давления на лопасти в некавитационном потоке. Необходимым условием возникновения кавитации в какой-либо точке лопасти РК является уменьшение давления в этой точке до давления насыщенных водяных паров  $p_v$ . Соответственно, на поверхности лопасти может быть определена изолиния давления  $p = p_v$ , и выделена область кавитации. Оценку кавитационных качеств РК ПЛ гидротурбин предложено производить по величине взвешенной относительной площади на тыльной стороне лопасти, занятой кавитацией:

$$W_{\text{cav}} = \frac{\int_{S_{\text{cav}}} x dS_y - y dS_x}{\int_{S_{\text{suc}}} x dS_y - y dS_x}, \quad (2)$$

где:  $S_{\text{cav}}$  – площадь области на тыльной стороне лопасти с давлением меньше  $p_v$ ;  $S_{\text{suc}}$  - площадь всей тыльной стороны лопасти. В числителе стоит момент площади области кавитации  $S_{\text{cav}}$  относительно оси вращения РК. В знаменателе стоит момент площади всей тыльной поверхности лопасти  $S_{\text{suc}}$ . Фактически это равносильно введению весовой функции, позволяющей учесть не только площадь, но и местоположение области кавитации. У лопастей с лучшими кавитационными качествами взвешенная относительная площадь должна быть меньше.

Для верификации предложенного метода были использованы данные модельных испытаний, проведенных в лаборатории водяных турбин СКБ «Гидротурбомаш» в проточной части гидротурбины ПЛ 20. Испытания проводились для трех лопастных



систем. На универсальных характеристиках, полученных по результатам модельных испытаний, был выбран режим  $n_1' = 150$  об/мин,  $Q_1' = 2.2$  м<sup>3</sup>/с. В данной режимной точке, с помощью программного комплекса «CADRUN», проведены гидродинамические расчеты для трех РК. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 можно видеть, что рабочие колеса «А» и «Б» имеют близкий коэффициент кавитации  $\sigma_l$  и взвешенные относительные площади  $W_{cav}$  получились близкими по значению. Рабочее колесо «В» имеет существенно лучший коэффициент кавитации  $\sigma_l$  и взвешенная относительная площадь  $W_{cav}$  тоже получилась заметно меньше. Следовательно, при решении оптимизационной задачи, кавитационные качества РК могут быть оценены по величине взвешенной относительной площади  $W_{cav}$  зоны кавитации на тыльной стороне лопасти.

Таблица 1 - Сопоставление результатов расчета с экспериментом

	эксперимент			расчет		
	$n_1'$ об/мин	$Q_1'$ м <sup>3</sup> /с	$\sigma_l$	$n_1'$ об/мин	$Q_1'$ м <sup>3</sup> /с	$W_{cav}$
Рабочее колесо А	150	2.2	1.07	150	2.1907	0.1941
Рабочее колесо Б	150	2.2	1.08	150	2.204	0.2138
Рабочее колесо В	150	2.2	0.83	150	2.1859	0.0641

**В третьей главе** разработана методика 2-х режимного (режим 1 - оптимальный, режим 2 - форсированный) 3-х целевого (повышение КПД<sub>1</sub> (режим 1), КПД<sub>2</sub> (режим 2) и улучшение кавитационных качеств турбины (режим 2)) оптимизационного проектирования лопастной системы РК ПЛ гидротурбины. При таком подходе оптимизация направлена на повышение КПД в оптимуме и обеспечение пологости универсальной характеристики одновременно с улучшением кавитационных характеристик турбины в наиболее кавитационно-опасном режиме. В качестве метода, направляющего оптимизационный поиск, выбран генетический алгоритм. Вариация формы РК осуществляется путем вариации срединной поверхности лопасти. Используется «относительная параметризация», т.е. варьируется не сама поверхность, а ее отклонение от исходной. Критерии качества формы лопасти РК сформулированы в виде целевых функций, которые вычисляются на основе прямого расчета трехмерных полей течения. Гидродинамические расчеты проводятся по комбинированной методике расчета потерь для приведенной гидротурбины при фиксированном напоре  $H=1$ м в постановке «АКО с зазорами». Модель турбулентности – стандартная  $k-\varepsilon$ .

Описан метод оптимизационного поиска, используемый в программном комплексе «Cadrun-opt» – генетический алгоритм (ГА). Идея ГА заимствована у теории эволюции. В нем используются аналоги механизма генетического наследования и аналоги механизма естественного отбора. Согласно теории, 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. При проектировании лопастной системы РК индивидуумом является лопасть. Индивидуумом также называют набор параметров  $X = (X_1, \dots, X_N)$ , определяющих эту лопасть.

Выбрана методика 2-х режимного (режим оптимального КПД и форсированный режим) оптимизационного проектирования, которая позволяет обеспечить высокий средневзвешенный КПД и требуемые кавитационные качества гидротурбины. Перед выбором режимов для проектирования необходимо рассчитать прогнозные

пропеллерные характеристики на угле установки лопасти, близком к оптимальному, и на угле, соответствующем форсированному режиму. Выбранные режимы должны быть комбинаторными.

Описан способ параметризации лопасти РК. Параметризация поверхности лопасти РК должна с одной стороны обеспечить гибкое изменение геометрической формы лопастной системы, а с другой – содержать по возможности меньшее число параметров. Форма лопасти РК ПЛ гидротурбины представляется в виде:

$$\mathbf{R}_{blade}(u, v) = \mathbf{r}(u, v) + d(u, v) \cdot \mathbf{n}(u, v), \quad u, v \in [0, 1] \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}(u, v) = \{R(u, v), Z(u, v), \Phi(u, v)\}$  – срединная поверхность, представленная в цилиндрической системе координат,  $d(u, v)$  – функция распределения толщин,  $\mathbf{n}(u, v)$  – орт нормали к срединной поверхности. Тогда модификация формы лопасти РК может осуществляться путем вариации ее срединной поверхности и функции распределения толщин. В работе для формы лопасти РК ПЛ гидротурбины реализована только вариация срединной поверхности лопасти путем:

- вариации функции угловой координаты  $\Phi(u, v)$ ;
- вариации формы входной и выходной кромок срединной поверхности (вариация меридиональной проекции).

Сохранение функции распределения толщин увеличивает вероятность того, что модифицированные РК будут отвечать прочностным ограничениям.

Таким образом, модификация формы лопасти ПЛ РК осуществляется путем вариации 24 геометрических параметров: 16 угловых и 8, отвечающих за меридиональную проекцию (рис.2). Данная параметризация представляется вектором  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_\Phi, \mathbf{X}_{RZ}) = (x_1, \dots, x_{16}, x_{17}, \dots, x_{24}). \quad (4)$$

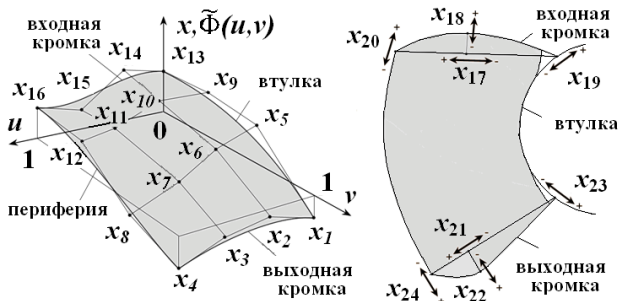


Рис. 2 Параметризация лопасти рабочего колеса

При оптимизации на вектор  $\mathbf{X}$  выставляются фазовые ограничения. Преимуществом относительного способа параметризации является то, что исходная лопасть может быть получена любым способом проектирования и всегда будет лежать во множестве параметризуемых лопастей (при  $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_\Phi, \mathbf{X}_{RZ})=0$ ).

Разработаны целевые функции и ограничения. Проведение гидродинамического расчета по комбинированной методике в постановке «АКО с зазорами» позволяет принять в качестве основной целевой функции потери в гидротурбине, определяемые из расчета 3-х мерного течения вязкой несжимаемой жидкости, замкнутой выбранной моделью турбулентности:

$$Eff = 1 - \eta. \quad (5)$$

КПД гидротурбины  $\eta$  рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{M\omega}{\rho g Q H} \eta_m \eta_o, \quad (6)$$

где:  $M$  – момент на валу рабочего колеса,  $\omega$  - угловая скорость вращения рабочего колеса,  $Q$  – расход через турбину,  $H$  – заданный напор,  $\eta_m$  – механический КПД,  $\eta_o$  – объемный КПД. Для ПЛ гидротурбин полагается, что  $\eta_m = \eta_o = 1$ .

При 2-х режимном проектировании требование минимизации потерь или максимизации КПД сводится к повышению КПД на двух режимах работы гидротурбины: оптимальном  $(Q_1^{(1)}, n_1^{(1)})$  и форсированном  $(Q_1^{(2)}, n_1^{(2)})$ .

В главе 2 был верифицирован способ оценки кавитационных качеств РК, основанный на расчете по формуле (2) взвешенной относительной площади  $W_{cav}$  зоны кавитации на тыльной стороне лопасти. Поскольку наиболее кавитационно-опасным является форсированный режим, то функция  $W_{cav}$  минимизируется только для форсированного режима. Следует отметить, что при использовании данной целевой функции нет необходимости вводить дополнительную весовую функцию, учитывающую местоположение области кавитации на тыльной поверхности.

При решении оптимизационной задачи гидродинамические расчеты течения в проточном тракте проводятся при следующих фиксированных параметрах: открытии  $a_0$  НА, угле  $f_i$  установки лопасти РК, частоте  $n_1'$  и полном напоре турбины  $H=1$  м. Расход находится в процессе решения. В такой постановке расход, пропускаемый модифицированной лопастью через турбину, может существенно отличаться от начального расхода, заданного в режимной точке  $(Q_1', n_1')$ . Корректное сравнение КПД и кавитационных качеств исходной и модифицированной лопастных систем возможно только при условии сохранения заданной режимной точки. Для соблюдения этого условия на каждом режиме вводится ограничение на величину расхода, полученного в результате расчета модифицированной лопастной системы:

$$Q_1'^* - \varepsilon_1 < Q_1' < Q_1'^* - \varepsilon_2, \quad (7)$$

где  $Q_1'^*$  – приведенный расход в заданной режимной точке,  $Q_1'$  – приведенный расход, полученный по результатам расчета,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – допустимые отклонения. Модифицированные лопастные системы, не удовлетворяющие этому ограничению, исключаются из оптимизации.

После проведения серии оптимизационных расчетов было принято решение о модификации целевых функций и введении дополнительных ограничений.

Возможное отклонение расхода модифицированных геометрий от заданного указывает на недостаток прямой максимизации КПД в форсированном режиме. Действительно, в форсированном режиме комбинаторная зависимость  $\eta(Q)$  имеет существенный наклон. В ходе максимизации КПД может получиться геометрия, имеющая КПД выше, чем у исходной лопасти, но с меньшим расходом и лежащая ниже комбинаторной зависимости  $\eta(Q)$  исходного РК. Эта геометрия обозначена на рисунке 3 серым квадратом.

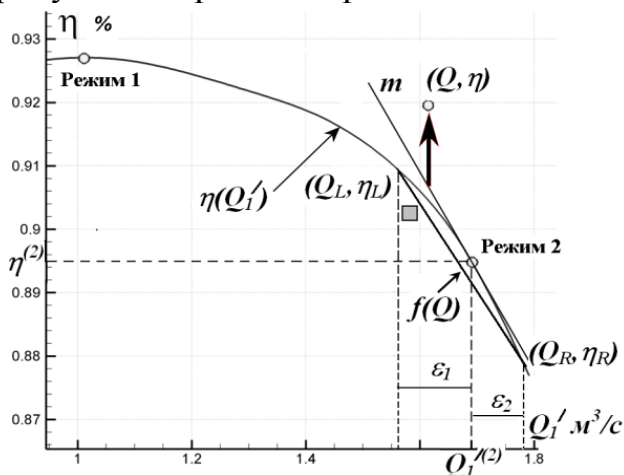


Рис. 3 Зависимость  $\eta(Q)$  для исходной лопасти, используемая для оценки  $Eff\_Slope$

Проблема может быть решена уменьшением допустимых отклонений  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , однако, при жестких ограничениях велика вероятность вырождения поколения. Поэтому предложен и применен другой подход. Целевая функция, отвечающая за КПД на форсированном режиме, модифицирована. Фактически, максимизируется не КПД, а *превышение* точки  $(Q, \eta)$  над прямой  $m$ , касательной к зависимости  $\eta(Q)$  исходной лопасти в точке  $Q_1'^{(2)}$ , (рис. 3). Далее будем обозначать эту целевую функцию  $Eff\_Slope$ . В связи с тем, что зависимость

$\eta(Q)$  для исходной лопасти известна не всегда, а также для упрощения способа

нахождения тангенса угла наклона касательной  $m$ , предложен следующий способ: зависимость  $\eta(Q)$  в окрестностях точки  $Q_I^{(2)}$  аппроксимируется прямой  $f(Q)$ , построенной следующим образом (рис. 3). Пусть  $(Q_L, \eta_L)$  точка, соответствующая левому ограничению, а  $(Q_R, \eta_R)$  точка, соответствующая правому. Тогда уравнение прямой, аппроксимирующей зависимость  $\eta(Q)$ :

$$f(Q) = \eta_R - (Q_R - Q) \frac{\eta_R - \eta_L}{Q_R - Q_L} \quad (8)$$

где  $\eta_R$  и  $\eta_L$  – КПД, полученные в результате прямых расчетов прототипа. Модифицированная функция, подлежащая минимизации, запишется как:

$$Eff\_Slope = 1 - (\eta - f(Q)) \quad (9)$$

Эту аппроксимацию можно осуществить исходя из соображений, что диапазон ограничения по расходу обычно не широк.

Аналогичная ситуация возникает и при оптимизации с использованием функции  $Wcav$ . В окрестности форсированного режима зависимость  $Wcav(Q)$  имеет существенный наклон. Поэтому при прямой минимизации  $Wcav$  может получиться геометрия, у которой величина  $Wcav$  ниже, чем у исходного варианта, но на меньшем расходе.

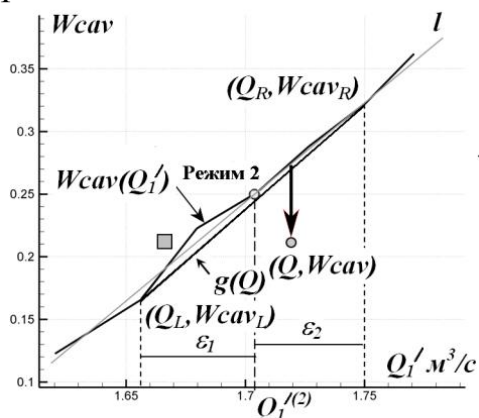


Рис.4 Зависимость  $Wcav(Q)$  для исходной лопасти и используемая для оценки  $Wcav\_Slope$

Чтобы таких вариантов геометрий не получалось, используется модифицированная функция  $Wcav\_Slope$ , которая максимизирует понижение точки  $(Q, Wcav)$  от прямой  $l$  (рис. 4). Также, как и в случае с зависимостью  $\eta(Q)$  предложен способ аппроксимации зависимости  $Wcav(Q)$  в окрестности точки  $Q_I^{(2)}$  прямой  $g(Q)$ .

Пусть  $(Q_L, Wcav_L)$  точка, соответствующая левому ограничению, а  $(Q_R, Wcav_R)$  точка, соответствующая правому. Тогда уравнение прямой, аппроксимирующей зависимость  $Wcav(Q)$ :

$$g(Q) = Wcav_R - (Q_R - Q) \frac{Wcav_R - Wcav_L}{Q_R - Q_L}, \quad (10)$$

где  $Wcav_R$  и  $Wcav_L$  –  $Wcav$ , полученные в результате прямых расчетов прототипа. Модифицированная функция, подлежащая минимизации, запишется как:

$$Wcav\_Slope = Wcav - g(Q). \quad (11)$$

Необходимость одновременного улучшения энергетических и кавитационных качеств РК предъявляет противоречивые требования к геометрическим параметрам, отвечающим за форму лопасти. Так, например, оптимальная с точки зрения энергетических показателей форма лопасти РК может оказаться неприемлемой с точки зрения ее кавитационных качеств. При оптимизации с тремя целевыми функциями, описанными выше, фронт Парето, как правило, содержит большое число индивидуумов, имеющих хорошие кавитационные качества и низкий уровень КПД (рис.5). Эти индивидуумы заведомо неприемлемы для проектировщика. Тем не менее, как равноправные члены множества Парето, они дают потомков при создании нового поколения, большая часть из которых также будет лежать в области заведомо неприемлемых решений.

Для более эффективного использования вычислительных ресурсов и сосредоточения поиска в зоне приемлемых решений предложено ввести ограничение на минимально допустимый уровень КПД

$$\eta^{(i)} > \eta_{min}^{(i)}, \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

Лопастей, не удовлетворяющих этим ограничениям, исключаются из дальнейшей оптимизации. Введение данных ограничений существенно увеличивает количество анализируемых геометрий в области приемлемых решений и тем самым ускоряет процесс поиска формы лопасти РК, отвечающей всем поставленным требованиям.

На рисунках 6 и 7 представлены фрагменты фронтов Парето в зоне приемлемых решений оптимизационных расчетов для РК с напором  $H$  до 40м (ПЛ 40) с тремя целевыми функциями  $Eff$ ,  $EffSlope$ ,  $WcavSlop$ . Оптимизационные расчеты проводились без использования ограничения на минимально допустимый уровень КПД (рис. 6), и с использованием данного ограничения (рис. 7). Рассчитано одинаковое количество поколений. Из рисунков видно, что при решении оптимизационной задачи с использованием ограничения на минимально допустимый уровень КПД удалось получить индивидуумы с лучшими кавитационными качествами и более высоким уровнем КПД.

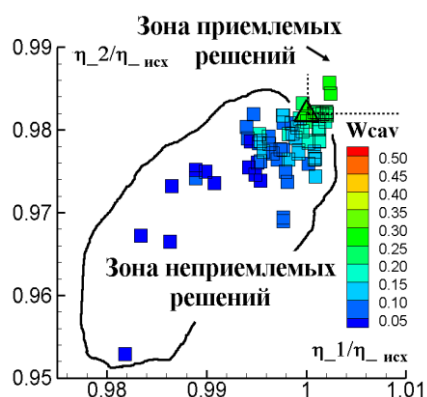


Рис. 5 3-х целевая оптимизация ПЛ 40 ( $Eff1$ ,  $Eff\_Slope$ ,  $Wcav\_Slope$ )

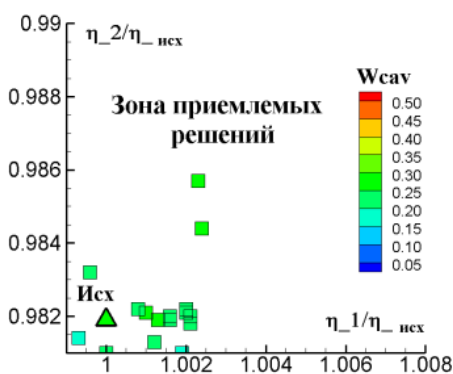


Рис. 6 3-х целевая оптимизация ПЛ 40 без ограничения на минимальный уровень КПД

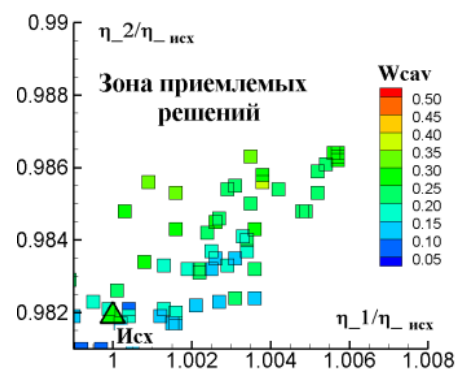


Рис. 7 3-х целевая оптимизация ПЛ 40 с ограничениями на минимальный уровень КПД

Важным требованием к проектированию ПЛ РК является сохранение положения оптимума пропеллерной характеристики по оборотам. Это требование обусловлено зоной работы РК. Для проверки соблюдения этого требования для выбранной с фронта Парето геометрии рассчитывается пропеллерная характеристика на угле установки лопасти, близком к оптимальному. Положение оптимума сравнивается с положением оптимума исходной лопасти, отклонение не должно превышать  $\pm 3$  об/мин. Если выбранная лопасть не удовлетворяет данному требованию с фронта Парето необходимо выбрать другой индивидуум.

Прочностные ограничения при решении оптимизационной задачи не ставились. Из накопленного в СКБ «Гидротурбомаш» ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» опыта известно, что при заданных фазовых ограничениях на изменение формы лопасти, функция распределения толщин по лопасти вносит наибольший вклад в изменение прочностных характеристик. То есть, если исходная лопасть удовлетворяет всем прочностным ограничениям, то и модифицированная лопасть, при условии неизменности функции распределения толщин, с большой долей вероятности будет им удовлетворять. Окончательная проверка прочностных ограничений проводится сектором прочностных расчетов СКБ «Гидротурбомаш» по завершении оптимизационного расчета. Проверка проводится для лопасти, выбранной с фронта

Парето по ее гидродинамическим характеристикам. Если выбранная лопасть не удовлетворяет прочностным ограничениям, то с фронта Парето необходимо выбрать другой индивидуум.

Таким образом, лопастная система РК ПЛ гидротурбины оптимизируется на двух режимах работы: оптимальном режиме и форсированном режиме. В качестве целевых функций задаются:  $Eff$  – минимизация потерь на оптимальном режиме,  $Eff\_Slope$  – минимизация потерь на форсированном режиме с учетом зависимости  $\eta(Q)$ ,  $WcavSlope$  – минимизация взвешенной относительной площади кавитации  $Wcav$  на тыльной стороне лопасти на форсированном режиме с учетом зависимости  $Wcav(Q)$ . При проведении оптимизационных расчетов ставятся ограничения на величину расхода, полученного в результате расчета модифицированной лопастной системы, и на минимально допустимый уровень КПД. Ограничения выставляются для каждого режима.

Порядок проведения оптимизационного проектирования в соответствии с разработанной методикой представлен на рисунке 8.

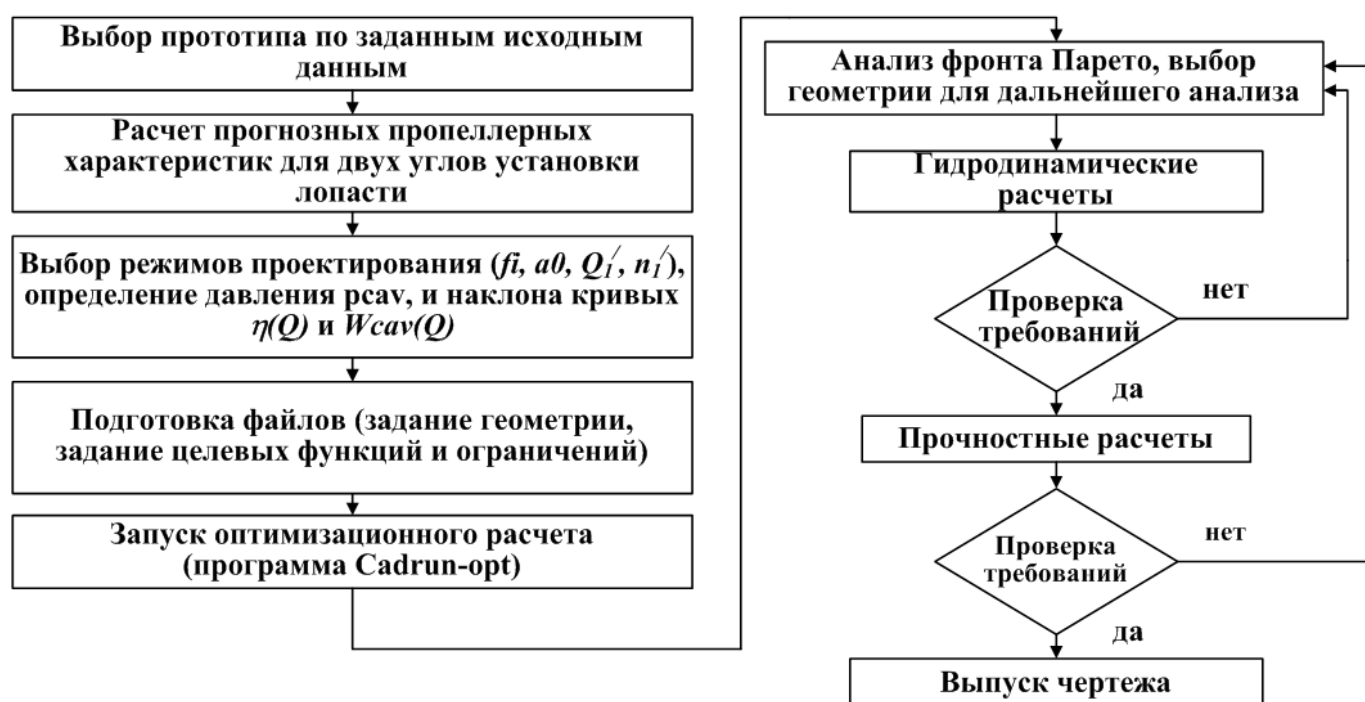


Рис. 8 Порядок проведения оптимизационного проектирования

В четвертой главе представлены результаты применения разработанной методики к проектированию лопастей РК ПЛ гидротурбин разной быстроходности. Все гидродинамические расчеты проводились по уточненной комбинированной методике расчета потерь с использованием программного комплекса «CADRUN» для приведенной гидротурбины в стационарной циклической постановке с использованием  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Расчет течения проводился в постановке «АКО с зазорами». Потери в спиральной камере принимались пропорциональными  $Q^2$ . Расчет проводился при фиксированных: открытии  $a_0$  НА, угле  $fi$  установки лопасти РК и полном напоре турбины. Расход определялся в процессе решения. Оптимизационная задача решалась с использованием программного комплекса «CADRUN-opt». Проводилась 2-х режимная, 3-х целевая оптимизация. Варьировались все 24 геометрических параметра лопасти.

Для верификации данной методики была выбрана гидротурбина ГЭС Джердап-1 (ПЛ 40,  $z_j=6$ ). При замене РК в рамках реконструкции, осуществляемой ОАО

«Силловые машины», в гидравлической лаборатории Турбоинститута г. Любляна были проведены энергетические и кавитационные испытания «старого» (до реконструкции) и «нового» (спроектированного по инженерной методике) РК. Сопоставление результатов расчета по разработанной методике с результатами энергетических испытаний представлено на рисунках 9, 10.

Сравнение кавитационных качеств РК проведено для форсированного режима ( $n_1' = 133,28$  об/мин и  $Q_1' = 1,8$  м<sup>3</sup>/с). Согласно данным эксперимента кавитационные качества РК в этой рабочей точке практически одинаковы ( $\sigma I = 0.71$  – для «старого» РК,  $\sigma I = 0.72$  – для «нового» РК). Результаты расчета представлены на рисунках 13, 14.

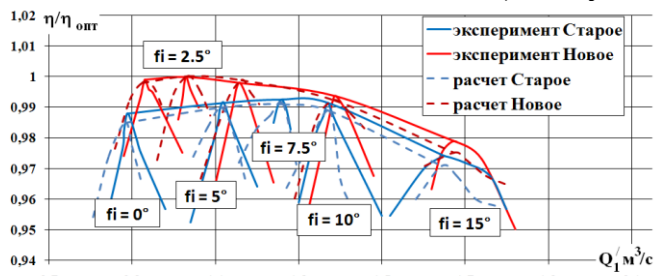


Рис. 9 Сравнение зависимости нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 125,93$  об/мин (эксперимент – расчет)

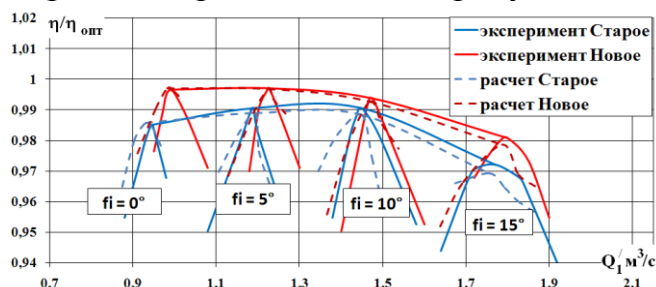


Рис. 10 Сравнение зависимости нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 133,28$  об/мин (эксперимент - расчет)

С применением разработанной методики спроектировано «оптимизированное» РК. В качестве исходного РК при решении оптимизационной задачи выбрано «новое» РК. Режимы, целевые функции и ограничения для проведения оптимизационного расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Исходные данные для оптимизационного расчета РК (ПЛ 40,  $z_I = 6$ ).

Режим	Целевые функции	Ограничения
$fi = 2.5^\circ, a_0 = 17$ мм, $n_1' = 125,93$ об/мин ( $Q_1' \sim 1.03$ м <sup>3</sup> /с)	$Eff$	$Q_1' \in [0.99, 1.07]$ $\eta > 0.99 * \eta / \eta_{opt\ ucx}$
$fi = 15^\circ, a_0 = 24$ мм, $n_1' = 133.28$ об/мин ( $Q_1' \sim 1,74$ м <sup>3</sup> /с)	$Eff\_Slope;$ $Wcav\_Slope$	$Q_1' \in [1,7, 1,78]$ $\eta > 0.966 * \eta / \eta_{opt\ ucx}$

В результате решения оптимизационной задачи было рассчитано 30 поколений по 96 индивидуумов в каждом. С рассчитанного фронта Парето была выбрана геометрия для дальнейшего анализа. Проведены все необходимые гидродинамические и прочностные расчеты. Результаты гидродинамических расчетов представлены на рисунках 11-15.

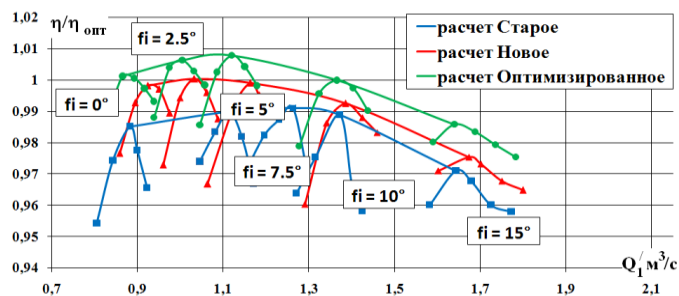


Рис. 11 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 125,93$  об/мин (расчет)

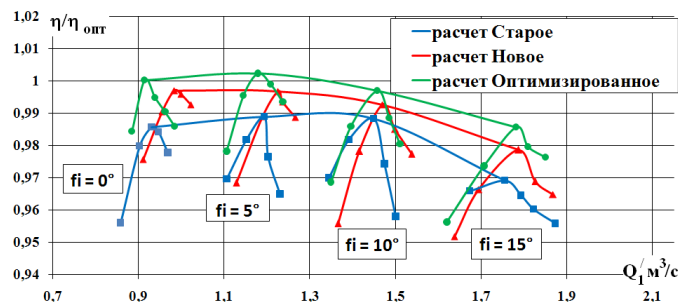


Рис. 12 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 133,28$  об/мин (расчет)

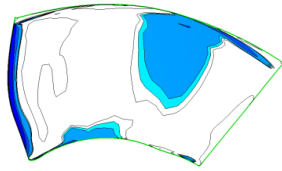


Рис. 13 Распределение давления по тыльной поверхности для старого РК ( $W_{cav} = 0.2520$ ) Эксперимент  $\sigma l=0.71$

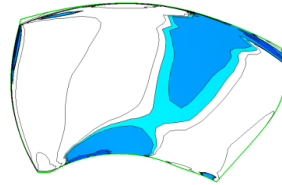


Рис. 14 Распределение давления по тыльной поверхности для нового РК ( $W_{cav} = 0.2641$ ) Эксперимент  $\sigma l=0.72$

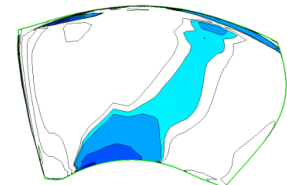


Рис. 15 Распределение давления по тыльной поверхности для оптимизированного РК ( $W_{cav} = 0.1976$ )

Из представленных результатов можно видеть, что используемые методы расчета характеристик турбины позволяют надежно оценивать энергетические и кавитационные качества гидротурбины. «Новое» РК имеет лучшие чем «старое» РК энергетические показатели и сопоставимые с ним кавитационные качества, что соответствует результатам эксперимента (рис. 9-10 и рис. 13-14). РК, разработанное с применением методики оптимизационного проектирования, превосходит исходное («новое») и по энергетическим и по кавитационным показателям.

Далее разработанная методика была применена для проектирования РК ПЛ 30,  $z_1 = 5$  и РК ПЛ 20,  $z_1 = 5$ . В качестве исходных были выбраны существующие в ОАО «Силловые машины» рабочие колеса. Все РК, спроектированные с применением методики оптимизационного проектирования, превосходят исходные и по энергетическим и по кавитационным показателям.

Исходные данные и результаты решения оптимизационной задачи для РК ПЛ 30 представлены в таблице 3 и на рисунках 16-19.

Таблица 3 - Исходные данные для оптимизационного расчета РК (ПЛ 30,  $z_1=5$ ).

Режим	Целевые функции	Ограничения
$f_i = 3,1^\circ$ , $a_0=30$ мм, $n_i=135$ об/мин ( $Q_i \sim 1.11$ м <sup>3</sup> /с)	<i>Eff</i>	$Q_i' \in [1,06, 1,17]$ $\eta > 0.989 * \eta / \eta_{opt\ ucx}$
$f_i = 17,1^\circ$ , $a_0=38$ мм, $n_i=130$ об/мин ( $Q_i \sim 1,87$ м <sup>3</sup> /с)	<i>Eff_Slope</i> <i>Wcav_Slope</i>	$Q_i' \in [1,83, 1,91]$ $\eta > 0.955 * \eta / \eta_{opt\ ucx}$

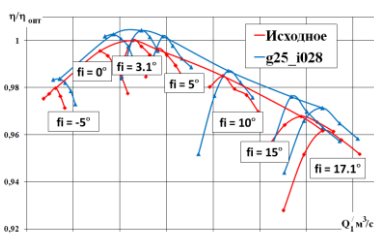


Рис. 16 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_i = 135$  об/мин (расчет)

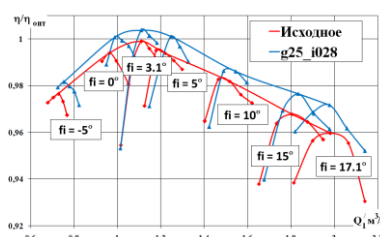


Рис. 17 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_i = 130$  об/мин (расчет)

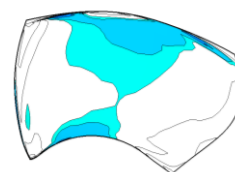


Рис. 18 Распределение давления по тыльной поверхности для исходного РК ( $W_{cav} = 0.2430$ )

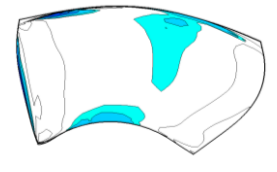


Рис. 19 Распределение давления по тыльной поверхности для РК g25\_i028 ( $W_{cav} = 0.1754$ )

Исходные данные и результаты решения оптимизационной задачи для РК ПЛ 20 представлены в таблице 4 и на рисунках 20-23.

Таблица 4 - Исходные данные для оптимизационного расчета РК (ПЛ 20,  $z_1=5$ ).

Режим	Целевые функции	Ограничения
$f_i = 0^\circ$ , $a_0=24$ мм, $n_i=140$ об/мин ( $Q_i \sim 1.11$ м <sup>3</sup> /с)	<i>Eff</i>	$Q_i' \in [1,06, 1,17]$ $\eta > 0.99 * \eta / \eta_{opt\ ucx}$
$f_i = 15^\circ$ , $a_0=34$ мм, $n_i=150$	<i>Eff_Slope</i>	$Q_i' \in [2,04, 2,12]$



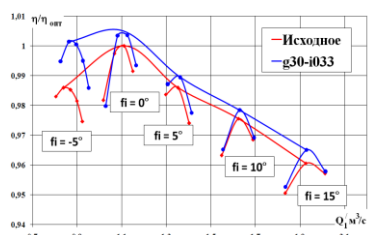


Рис. 20 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 140$  об/мин (расчет)

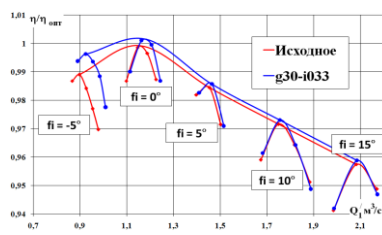


Рис. 21 Зависимость нормированного КПД от расхода для  $n_1' = 150$  об/мин (расчет)

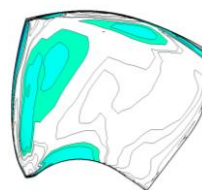


Рис. 22 Распределение давления по тыльной поверхности для исходного РК ( $W_{\text{cav}} = 0.2692$ )

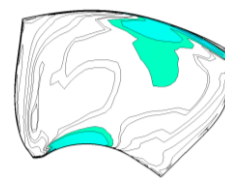


Рис. 23 Распределение давления по тыльной поверхности для РК g30\_i033 ( $W_{\text{cav}} = 0.1514$ )

Из представленных в 4-ой главе результатов можно видеть, что разработанная методика применима для проектирования лопастных систем рабочих колес поворотно-лопастных гидротурбин разной быстроходности.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

1. Разработана, апробирована и доведена до использования в инженерной практике методика оптимизационного проектирования лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины. Разработанная методика заложена в модуль оптимизационного проектирования поворотно-лопастной гидротурбины программного комплекса «CADRUN-opt». Программный комплекс «CADRUN-opt» с модулем оптимизационного проектирования поворотно-лопастной гидротурбины внедрен в СКБ «Гидротурбомаш» ОАО «Силловые машины» «ЛМЗ».

2. Уточнена и адаптирована к построению прогнозных пропеллерных характеристик поворотно-лопастных гидротурбин комбинированная методика расчета течения и потерь. В методике учтены особенности поворотно-лопастных гидротурбин. Показано, что для корректного прогнозирования энергетических характеристик поворотно-лопастных гидротурбин расчет потерь с использованием 3-х мерного моделирования турбулентного потока вязкой жидкости необходимо проводить в постановке «направляющий аппарат – рабочее колесо с зазорами – отсасывающая труба». Потери в спиральной камере и статоре могут быть оценены по инженерным формулам.

3. Предложено проводить проектирование с учетом анализа работы гидротурбины на режиме оптимального КПД и на форсированном режиме. При таком подходе к проектированию, достигается высокий уровень средневзвешенного КПД и улучшаются кавитационные качества рабочего колеса в наиболее кавитационно-опасном режиме. Выбранные для проектирования режимы должны соответствовать комбинаторным.

4. Предложен метод оценки кавитационных качеств рабочего колеса по величине взвешенной относительной площади зоны кавитации на тыльной поверхности лопасти. Границы зоны получены на основе анализа распределения давления по лопасти в некавитационном потоке. При использовании данного метода нет необходимости вводить дополнительную весовую функцию, учитывающую местоположение области кавитации на тыльной поверхности лопасти. Метод верифицирован.

5. Предложена целевая функция, отвечающая за улучшение кавитационных качеств лопастной системы на форсированном режиме.

6. Модифицированы целевые функции, отвечающие за оптимизацию формы лопастной системы на форсированном режиме. Необходимость модификации функций вызвана существенным наклоном зависимостей  $\eta(Q)$  и  $W_{cav}(Q)$  в окрестности форсированного режима и вероятностью вырождения фронта Парето при жестких ограничениях допустимого отклонения расхода от заданного.

7. Предложены ограничения на минимально допустимый уровень КПД гидротурбины на всех режимах проектирования. Введение ограничений, обусловленное необходимостью одновременного улучшения энергетических и кавитационных качеств рабочего колеса, позволило ускорить процесс поиска оптимальных решений.

8. С использованием разработанной методики и программного комплекса «CADRUN-opt» спроектированы рабочие колеса различной быстроходности (ПЛ 40, ПЛ 30, ПЛ 20) с повышенными кавитационными и энергетическими показателями.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

##### Публикации в изданиях Перечня ВАК

1. Семенова А.В. Применение метода многоцелевой оптимизации для проектирования формы лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины / Семенова А.В., Чирков Д.В., Скороспелов В.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013. - том 15. - №4(2). - С. 588-593.
2. Семенова А.В. Верификация численного прогнозирования энергетических характеристик поворотно-лопастных гидротурбин / Семенова А.В., Чирков Д.В., Скороспелов В.А. // Тяжелое машиностроение, 2014. - № 7. - С. 29-33.
3. Семенова А.В. Целевые функционалы при оптимизации рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины / Семенова А.В., Чирков Д.В., Лютов А.Е. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2014. - 3(202). - С. 97-106.
4. Семенова А.В. Многоцелевое оптимизационное проектирование формы лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины / Семенова А.В., Чирков Д.В., Скороспелов В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2015. - 1(214). - С. 59-70.

##### Публикации в зарубежных научных журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus

5. Pilev I. Multiobjective optimal design of runner blade using efficiency and draft tube pulsation criteria / Pilev I. M., Sotnikov A. A., Rigin V. E., Semenova A. V., Cherny S. G., Chirkov D. V., Bannikov D. V. and Skorospelov V. A. // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Beijing, China. 2012) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 15 (2012) 032003 doi:10.1088/1755-1315/15/3/032003 P. 1-8.
6. Semenova A. Multi-objective shape optimization of runner blade for Kaplan turbine / Semenova A., Chirkov D., Lyutov A., Cherny S., Skorospelov V., Pylev I. // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Montreal, Canada 2014 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 22 (2014) 012025 doi:10.1088/1755-1315/22/1/012025 P. 1-10

##### Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

7. Семенова А.В. Методические вопросы проектирования проточных частей поворотно-лопастных рабочих колес / Семенова А.В., Чирков Д.В. // Сборник докладов 15-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - С. 163-166.

8. Семенова А.В. Опыт проектирования поворотно-лопастных гидротурбин / Семенова А.В. Степанов В.Н. Чирков Д.В. // Сборник докладов международной научно-технической конференции СПб. СПбГПУ, 2012. - С. 135-143.
9. Семенова А.В. Оптимизационное проектирование рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины / Семенова А.В., Пылев И.М., Степанов В.Н., Степанов Ф.Ю., Гукасян А.Э., Чирков Д.В., Черный С.Г., Скорospelов В.А. // Hydro Vision 2013, Москва, 2013. - С. 1-16.
10. Pilev I. Experience in optimization design of turbine water passages shapes / Pilev I., Rigin V., Sonin V., Semenova A., Skorospelov V., Chirkov D., Astrakova A. // Hydro 2014, Cernobbio (Italy), 2014. - P.1-8.