

## **1. Название работы:**

Оптимизационное проектирование гидротурбин при одновременной вариации формы рабочего колеса и отсасывающей трубы

## **2. Описание работы:**

В процессе обучения в магистратуре решалась задача оптимизационного проектирования проточных частей гидротурбин при одновременной вариации формы рабочего колеса и отсасывающей трубы. Целью работы являлась разработка методики оптимизации РО гидротурбин для расширения зоны эффективной и устойчивой работы, а так же демонстрация преимуществ нового подхода, когда в процессе оптимизации одновременно варьируется форма колеса и трубы.

## **3. Современное состояние проблемы, со ссылками на источники, предпочтительно доступные в сети Интернет.**

Современные практические подходы к оптимизации гидротурбин основываются на моделировании течения с помощью усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для множества различных модификаций РК, определяемых 20-30 варьируемыми геометрическими параметрами, с использованием эволюционных алгоритмов для поиска оптимальной геометрии. Обычная цель оптимизации – это увеличение эффективности работы колеса или всей турбины в целом. Полноценное взаимодействие модифицированного колеса и существующей трубы учитывается контролем профиля скорости за колесом или моделированием течения в области, включающей в себя как модифицированное колесо, так и существующую трубу. Кавитационные характеристики колеса обычно контролируются с помощью распределения давления на тыльной стороне лопасти. Недавние подходы также позволяют учитывать эффективность на нескольких режимах, а также напряженно-деформированное состояние колеса. Также предпринимаются попытки косвенно учитывать динамические характеристики потока, когда один из целевых функционалов стремится привести профиль скорости за колесом к особому виду, что повлечет уменьшение пульсаций давления от вихря в ОТ.

## **4. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.**

Решаемая задача оптимизационного проектирования проточного тракта гидротурбин связана с расчетом трехмерных полей течения в гидротурбине для множества вариантов геометрий. При решении задачи используется генетический алгоритм, который может быть эффективно распараллелен и также требует использования большого объема вычислительных ресурсов. Схема процесса оптимизации изображена на рис. 1.

В ходе оптимизации для каждого перебираемого варианта геометрии проточного тракта проводится расчет трехмерного течения в турбине в рамках уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу и замкнутых стандартной k-ε моделью турбулентности. Уравнения решаются численно с использованием разработанного ранее комплекса CADRUN.

Для расчётов трёхмерного поля течения в проточном тракте гидротурбины используется циклическая постановка, требующая расчёта в одном канала НА, в одном вращающемся канале РК и во всей трубе. Расчёт течения производится для турбины, масштабированной на метровый диаметр и метровый напор ( $D_1=1\text{ м}$ ,  $H=1\text{ м}$ ).

Для успешной оптимизации формы проточного тракта важно разработать эффективную параметризацию поверхностей, с одной стороны содержащую небольшое число варьируемых параметров, с другой стороны, достаточно гибкую, чтобы обеспечить большое число допустимых форм проточного тракта. С этой целью были исследованы основные источники потерь энергии, возникающие в трубе. На основе исследования была построена параметризация ОТ, позволяющая эффективно влиять на эти потери, рис. 2.

Входной диаметр ОТ  $d_1$  определяется геометрией колеса и поэтому остаётся постоянным. Параметр скругления выходного сечения также зафиксирован  $r = 0$ . Диаметр  $d_2$  вместе с высотой  $h_1$  задают угол и длину конуса, влияющие на второстепенные течения в конусе ОТ, такие как отрыв потока от стенки ОТ или возвратные течения в центре конуса. К примеру, маленький угол конусности может уменьшить замедление потока в пограничном слое и, как следствие, предотвратить отрыв потока. Параметры  $l_2, h_2, h_3$  позволяют достаточно сильно менять форму колена ОТ. Их вариация может понизить потери, возникающие из-за второстепенных течений в колене и улучшить баланс расхода между выходными диффузорами. Отрыв потока и возвратные течения в выходных диффузорах ОТ можно контролировать с помощью параметров  $l_1, h_4, h_5, w$ , отвечающих за форму диффузора. Они также влияют на равномерность потока в выходном сечении ОТ, связанную с потерями  $h_{out}$ . Таким образом, разработанная параметризация ОТ имеет 9 свободных параметров и позволяет гибко варьировать форму трубы в соответствии с источниками основных потерь энергии.

Стоит отметить, что параметры  $h_1, l_1$  напрямую влияют на основные размеры гидротурбины, а потому определяют стоимость строительных работ. Отсюда вытекает возможная интересная постановка задачи проектирования турбин по уменьшению стоимости строительства ГЭС за счёт уменьшения высоты или длины трубы. Однако, как правило, для каждого проекта данные параметры заданы заранее и к ним стоит относиться с осторожностью. В данной работе параметры  $h_1$  и  $l_1$  были зафиксированы.

## 5. Полученные результаты

Для демонстрации преимуществ разработанного подхода, была проведена серия оптимизационных расчётов реальной РО-гидротурбины, направленных на повышение КПД в широком диапазоне режимов, в которых варьировалось одно колесо, одна труба и одновременно колесо и труба. Фронты Парето проведенных оптимизаций, а так же геометрии, отобранные для последующего анализа, изображены на рис. 3. Видно, что при одновременной оптимизации удаётся достичь в среднем на 0.3% более высокого КПД, чем при вариации одного колеса.

По результатам оптимизации для геометрий G1 и G2 сделан всесторонний анализ спроектированных проточных частей и течений в них как на уровне интегральных, так и локальных характеристик. Показаны преимущества проточных частей, спроектированных при одновременной вариации РК и ОТ.

Преимущество разработанного подхода к оптимизации проточных частей гидротурбин заключается в учёте взаимного влияния формы колеса и трубы. На практике это означает возможность в процессе оптимизации подбирать для каждого колеса оптимальную форму трубы и наоборот. При этом автоматически решается задача выполнимости течения на различных режимах.

## Иллюстрации

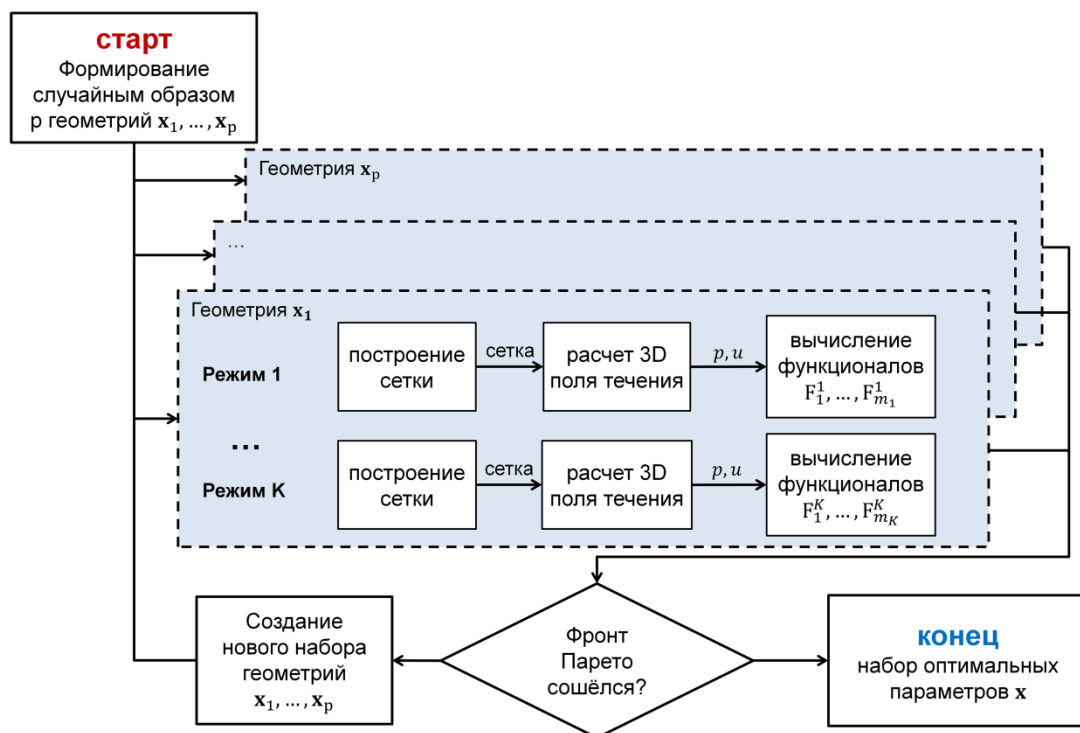


Рис. 1. Схема процесса оптимизации

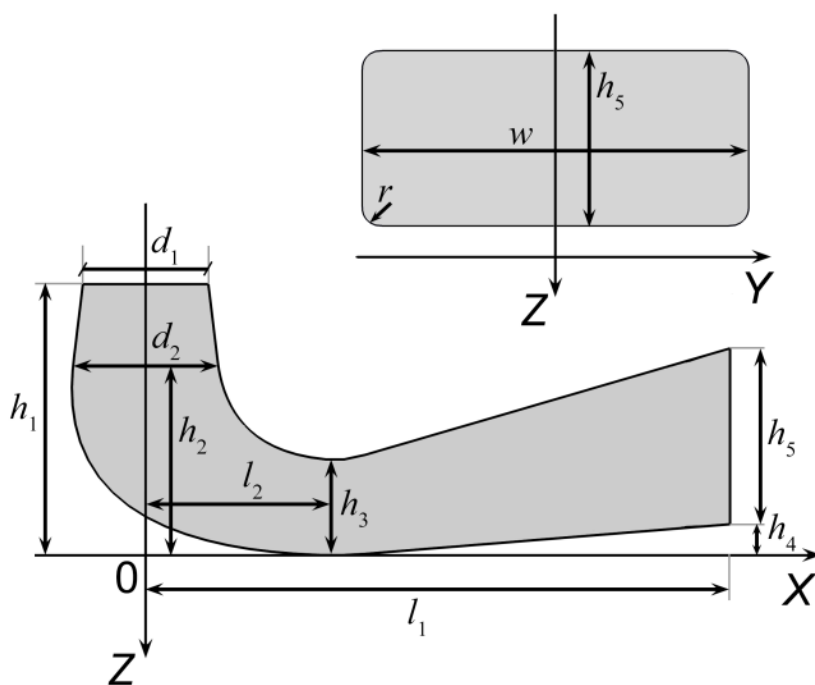


Рис. 2. Параметризация ОТ

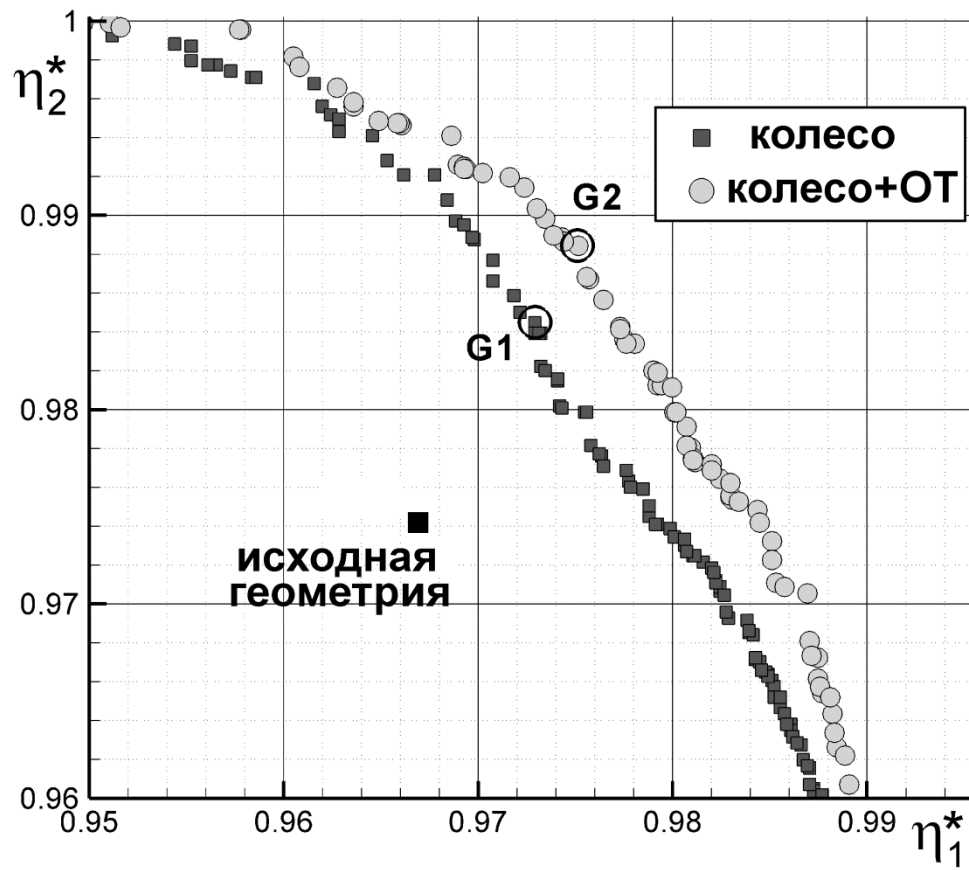


Рис. 3. Результаты оптимизационных расчётов