

Тема работы. Численное моделирование нестационарных течений и оптимизация формы проточного тракта гидротурбин

Состав коллектива

1. Чирков Денис Владимирович, Институт теплофизики СО РАН, с.н.с., к.ф.-м.н, chirkov.itp@gmail.com (руководитель);
2. Рогачева Анна Константиновна, Новосибирский государственный университет, магистрант;
3. Кочарина Алена Романовна, Новосибирский государственный университет, магистрант.

Научное содержание работы

1. Постановка задачи

Разработка и программная реализация параллельных алгоритмов для расчета нестационарного течения жидкости во всем проточном тракте гидротурбины. Разработка постановок задач, алгоритмов и программного инструментария для оптимизации формы отсасывающей трубы, с целью повышения КПД турбины и уменьшения ее заглубления.

2. Современное состояние проблемы

Для повышения надежности проектируемых гидравлических турбин необходимо уметь прогнозировать нестационарные особенности течения, такие как ротор-статор взаимодействие, вращение вихревого жгута в режимах неполной и повышенной нагрузки. Для адекватного расчета этих явлений необходимо рассчитывать течение во всей турбине, включая все межлопаточные каналы направляющего аппарата и рабочего колеса. Расчетная сетка, покрывающая весь проточный тракт, содержит от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов ячеек, что требует больших вычислительных затрат. За рубежом для таких расчетов используются коммерческие пакеты, такие как ANSYS CFX, Fluent, Numeca Fine Turbo. Поэтому актуально развитие отечественных вычислительных кодов и инструментов для проведения нестационарных расчетов течения во всем проточном тракте гидротурбины.

За последнее десятилетие основанная на CFD расчетах многоцелевая оптимизация стала стандартным подходом при проектировании рабочих колес гидротурбин. Отсасывающая труба – следующий по важности источник потерь энергии в турбине. Она преобразует кинетическую энергию на выходе из рабочего колеса в дополнительное разрежение давления. Однако проблеме оптимизации формы отсасывающих труб посвящено гораздо меньше работ, см. [1-4]. В этих работах течение в отсасывающей трубе рассчитывалось в рамках усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых робастной k - ϵ моделью. Основным целевым функционалом выступали потери энергии в трубе, подлежащие минимизации. При этом расчеты обычно проводились в одной отсасывающей трубе с фиксированным профилем скорости на входе в нее, и рассматривался режим, близкий к оптимальному [1,2]. В [3] в качестве одного целевого функционала взята взвешенная сумма потерь энергии в трубе в 9 режимах работы. Вторым интересным критерием качества, связанным с проектированием формы отсасывающей трубы, является минимизация ее высоты. Это требование исходит из соображений минимизации стоимости инженерных работ, необходимых для заглубления турбины на станции [1,3]. В [1,3] удалось снизить высоту отсасывающей трубы более чем на 30% без ухудшения гидродинамической эффективности трубы. В указанных выше работах форма отсасывающей трубы варьировалась значениями 5-12 свободных геометрических параметров. Задача оптимизации решалась различными вариантами эволюционного алгоритма, иногда с использованием суррогатных моделей, как, например, в [3]. В [4] нами впервые проведена совместная оптимизация рабочего колеса и отсасывающей трубы гидротурбины, позволившая увеличить КПД на 0,3% по сравнению с оптимизацией одного рабочего колеса или одной отсасывающей трубы. Данная работа является логическим продолжением [4]. В ней представлено расширение возможностей оптимизационного комплекса на случай оптимизации тороидальной отсасывающей трубы.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы и полученные результаты

Трехмерное течение в проточном тракте турбины описывается усредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса, замкнутыми $k-\varepsilon$ или SST $k-\omega$ моделью турбулентности. Вблизи стенок используется метод пристеночных функций. Для численного решения этих уравнений используется разработанный и развиваемый авторами пакет CADRUN. В нем связь скорости и давления осуществляется за счет использования метода искусственной сжимаемости. Дискретизация уравнений осуществляется с помощью неявной схемы конечных объемов. Невязкие потоки через грани ячеек вычисляются с использованием MUSCL схемы 3-го порядка аппроксимации, вязкие – с использованием центрально-разностной схемы 2-го порядка. Неявный оператор приближенно факторизуется в произведение двух операторов, каждый из которых обращается экономичным бегущим счетом. Численный алгоритм подробно описан в [5]. Алгоритм реализован на языке **Fortran**.

Сетка во всем проточном тракте турбины состоит из нескольких десятков структурированных блоков, рис. 1. Для распараллеливания счета каждому процессу кластера дается свой набор блоков. Переход на новую итерацию в каждом блоке осуществляется независимо от других блоков, после чего смежные блоки обмениваются граничными данными. Для реализации обмена с другими блоками за каждой границей отдельно взятого блока предусматриваются два ряда фиктивных ячеек, см. рис. 2. В 2021-2023 гг. существенно модифицирован алгоритм обмена данными при параллельном расчете. Последовательность расчета состоит из следующих шагов:

1. Зная \mathbf{Q}^s – решение на s -м слое – находится решение на следующем слое \mathbf{Q}^{s+1} во всех внутренних ячейках данного блока.
2. Далее происходит 3D интерполяция решения \mathbf{Q}^{s+1} из внутренних ячеек данного блока в фиктивные ячейки смежных с ним блоков. При этом, если смежный блок обрабатывается на нашем процессе, то найденные путем интерполяции значения кладутся непосредственно в фиктивные ячейки смежного блока. Если же смежный блок обрабатывается другим процессом, то найденные значения записываются в *буферные массивы*. Буферные массивы – это массивы фиктивных ячеек, которые необходимо послать на другие процессы, см. рис. 2.
3. Посылка буферов на другие процессы с использованием протокола MPI (MPI_ISEND).
4. Прием буферов (MPI_RECV) от других процессов и заполнение фиктивных ячеек данного блока.

Реализованный в 2021-2023 гг. алгоритм не зависит от топологии и размеров блочно-структурированной сетки, при условии, что каждый блок знает своих соседей. Кроме этого, он позволяет скрыть от пользователя и программиста большинство действий, связанных с MPI-обменами между процессами.

На рис. 3 показана картина стационарного течения в проточном тракте радиально-осевой гидротурбины, полученная с использованием обновленной программы. В 2023 г. работа по усовершенствованию расчетной программы будет продолжена с целью для повышения скорости счета, сокращения объема сохраняемых на диск данных. Планируется применить разработанную программу для детального исследования чувствительности амплитуды пульсаций давления в турбине, вызванных вихревым жгутом, к форме рабочего колеса.

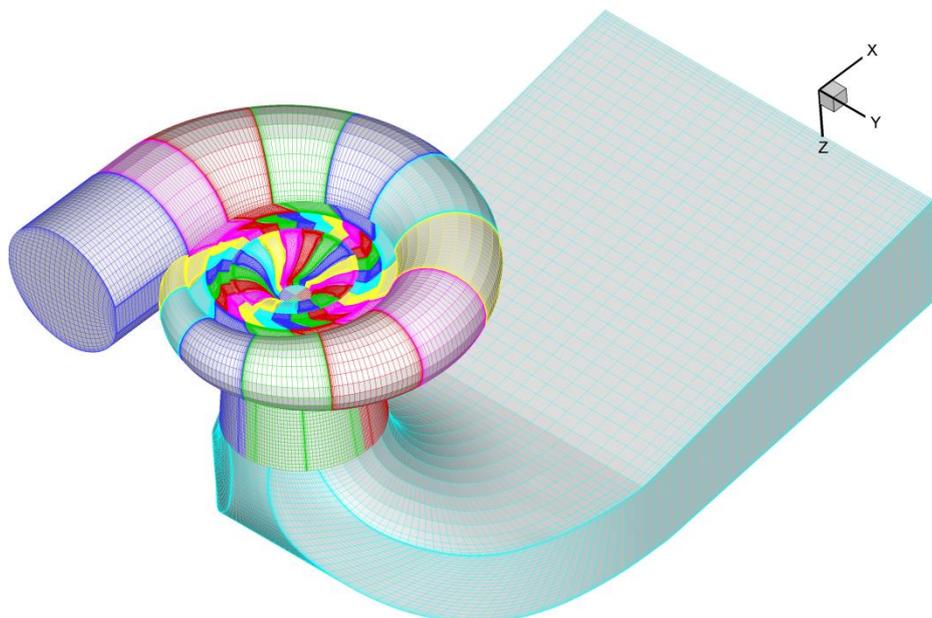


Рис. 1. Блочнo-структурированная сетка во всем проточном тракте гидротурбины (4 млн. ячеек).

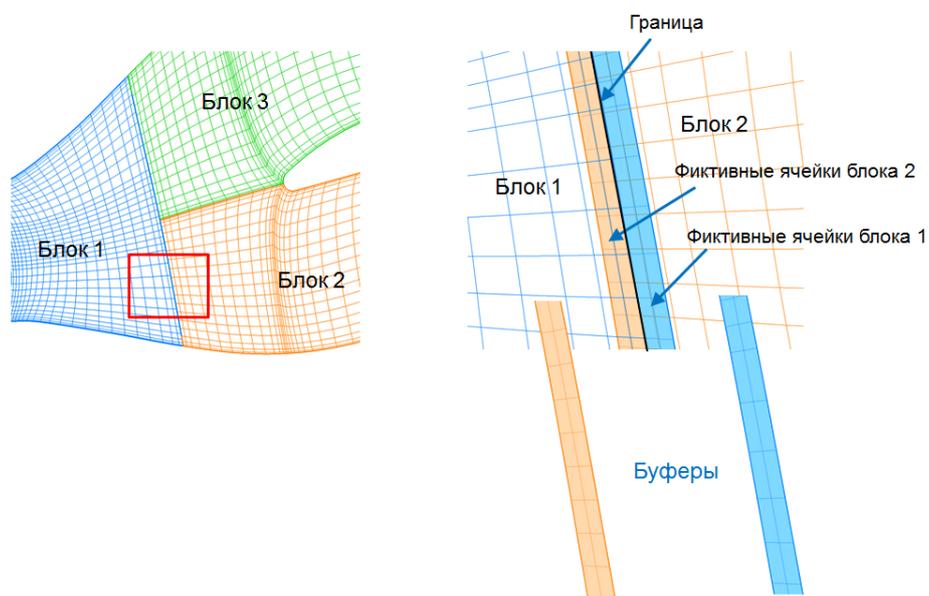


Рис. 2. Обмен данными между блоками.

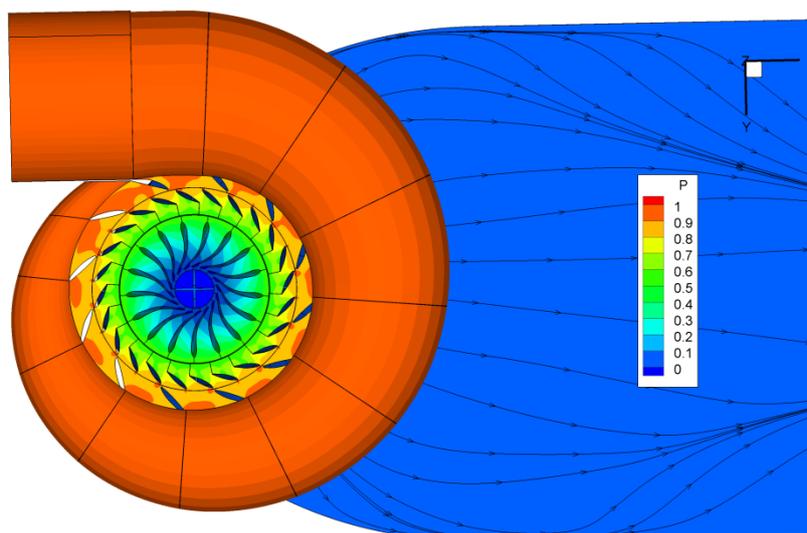


Рис. 3. Распределение давления в проточном тракте гидротурбины.

В 2021-2023 году разработаны постановка задачи и численные алгоритмы для оптимизации формы отсасывающей трубы (ОТ) гидротурбины. Параметризация геометрии тороидальной отсасывающей трубы разработана В.А. Скороспеловым и П.А. Турук (ИМ СО РАН). Она содержит 19 свободных параметров, совпадающих или близких по смыслу заложенным в рекомендации [7]. С учетом того, что габаритные параметры (длина, ширина трубы), как правило, зафиксированы, а некоторые параметры слабо влияют на характеристики работы ОТ, в реальных расчетах достаточно варьировать лишь 10-12 свободных геометрических параметров.

Для решения задачи оптимизации используется многоцелевой генетический алгоритм (MOGA), разработанный авторами [6]. Алгоритм MOGA требует больших вычислительных затрат: для нахождения фронта Парето требуется рассчитать течение для нескольких тысяч вариантов геометрии проточного тракта. Однако, алгоритм допускает эффективное распараллеливание, поскольку варианты геометрии, составляющие одно поколение, могут быть рассчитаны параллельно. Распараллеливание алгоритма MOGA реализовано с использованием протокола MPI.

Программа протестирована на задачах оптимизация формы и размеров отсасывающих труб ряда поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин. Тестовые расчеты показали, что отсасывающие трубы, спроектированные в соответствии с рекомендациями [7], обладают хорошей энергетической эффективностью. Оптимизация этих труб в рамках разработанной параметризации позволяет поднять КПД максимум на 0.15% в оптимальном режиме, в режимах неполной и повышенной нагрузки – на 0.3%. Однако в ходе оптимизации можно снизить высоту ОТ, спроектированной по ОСТ, на 5-10%, допустив уменьшение КПД турбины на 0.1-0.25%. Полученные «низкие» отсасывающие трубы можно использовать для снижения затрат на заглубление ОТ при строительстве ГЭС.

Ниже в качестве примера представлены результаты оптимизации отсасывающей трубы для перспективной радиально-осевой турбины на напор $H=200$ м. В качестве исходного варианта трубы взята «низкая» отсасывающая труба Чарвакской ГЭС. Для сравнения рассматривается также труба ОТ2, построенная в соответствии с рекомендациями из [7].

Оптимизация проводилась в двухрежимной постановке: Режим 1 (неполная нагрузка, приведенный расход $Q_{11}=0.63$) и Режим 2 (повышенная нагрузка, $Q_{11}=0.92$). Проводилась двухцелевая оптимизация: максимизация КПД турбины в режиме 1 и в режиме 2. Варьировались 13 параметров. Зафиксированы полная длина ОТ и ширина выходного диффузора. Высота трубы ограничена сверху высотой трубы ОТ2. В ходе оптимизации гидродинамические расчеты проводились в циклической постановке в области, включающей один канал направляющего аппарата, один межлопастной канал рабочего колеса и всю отсасывающую трубу. Сетка содержала 216672 ячеек.

Начальное поколение для алгоритма MOGA содержало 288 индивидуумов, остальные поколения – 144 индивидуума. Рассчитано 20 поколений, при этом фронт Парето фактически сошелся. Из полученного фронта Парето выбран один вариант G20_i004. На рис. 4 сравниваются исходный вариант ОТ, G20_i004 и ОТ2. Видно, что в ходе оптимизации высота трубы увеличилась и приблизилась к верхнему ограничению, то есть к высоте ОТ2. G20_i004 имеет меньший угол конусности в коническом диффузоре, а сам конус заметно длиннее чем у ОТ2.

На рис. 5 сравниваются зависимости КПД от расхода для исходного варианта, G20_i004 и ОТ2. На рис. 6, 7 показаны изолинии модуля скорости и линии тока на поверхности рассмотренных труб в режиме 2. Видно, что оптимизированный вариант G20_i004 имеет более равномерное поле скорости на выходе, что обуславливает меньшую величину выходных потерь h_{out} .

Эффективность работы отсасывающей трубы зависит не только от ее формы, но и от профиля скорости на входе в трубу. Поэтому в перспективе целесообразно проводить совместную оптимизацию рабочего колеса и отсасывающей трубы, как это предложено в [4].

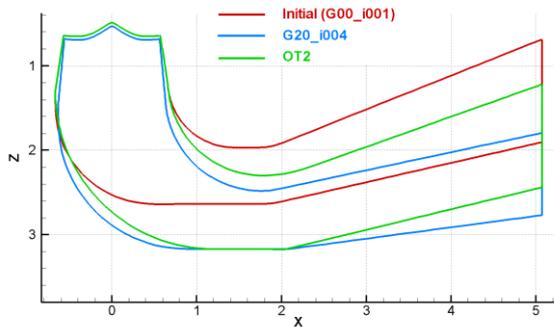


Рис. 4. Сравнение исходного варианта ОТ, G20_i004 и OT2.

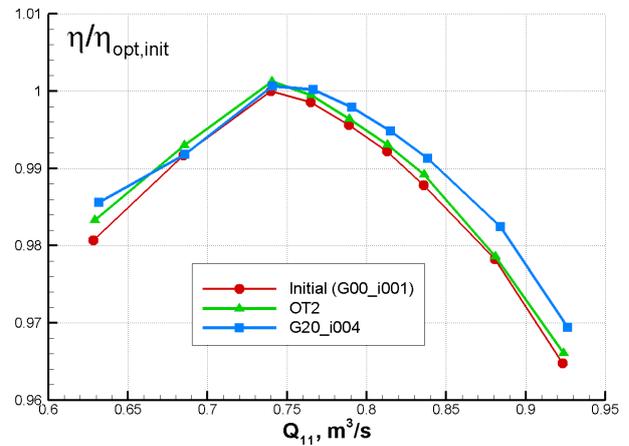


Рис. 5. Зависимость КПД от расхода.

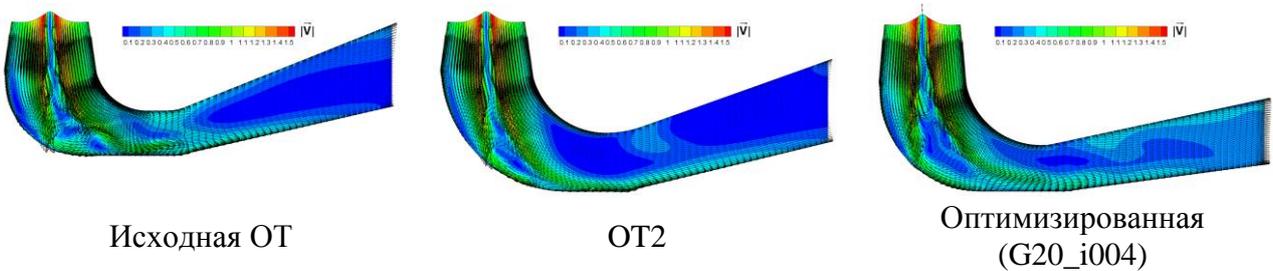


Рис. 6. Картина течения в ОТ в режиме 2. Изолинии модуля скорости.

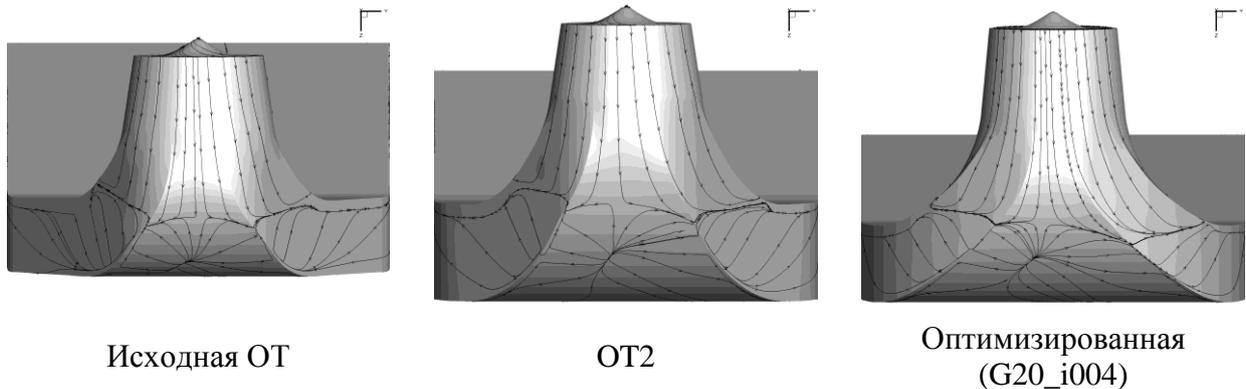


Рис. 7. Линии тока в конусе и колене ОТ в режиме 2.

Литература

- [1] Kurosawa S., Nakamura K. Design Optimization of a High Specific Speed Francis Turbine Using Multi-Objective Genetic Algorithm // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. - 2009 - Vol. 2, No. 2. - pp. 102-109.
- [2] Marjavaara B., Lundström T. Hydraulic Turbine Diffuser Shape Optimization by Multiple Surrogate Model Approximations of Pareto Fronts // *ASME J. Fluids Eng.* - 2007. - Vol. 129. - pp. 1228-1240.
- [3] McNabb J., Devals C., Kyriacou S. A., Murry N., Mullins B. F. CFD Based Draft Tube Hydraulic Design Optimization / Proc. of 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. - 2014. - pp. 1-10.
- [4] Lyutov A.E., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A., Cherny S.G. Coupled Multipoint Shape Optimization of Runner and Draft Tube of Hydraulic Turbines // *ASME Journal of Fluids Engineering*. - 2015. - Vol. 137, No. 111302.

- [5] Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров С.В. Численное моделирование течений в турбомашинах. - Новосибирск: Наука. - 2006. - 202 с.
- [6] Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Многорежимная оптимизация формы рабочего колеса гидротурбины // Вычислительные технологии. - 2009. - Т.14. - № 2. - С.32-50.
- [7] Губин М. Ф. Отсасывающие трубы гидроэлектростанций. – М: Энергия. – 1970. 270 с.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

За счет распараллеливания счета на десятки ядер вычислительного кластера существенно сокращается время расчета течения во всем проточном тракте гидротурбины. Так, стационарное течение во всей проточной части может быть рассчитано за 1.5-2 часа вместо суток на персональном компьютере.

Решение задачи оптимизации требует проведения трехмерных гидродинамических расчетов для большого числа вариантов геометрии. Поэтому успешное решение этой задачи за приемлемое время возможно лишь с использованием параллельного счета на многопроцессорном кластере.

Перечень публикаций, содержащих результаты работ

1. Chirkov D., Shcherbakov P., Skorospelov V., Turuk P. Towards numerical simulation of high part load pulsations in Francis turbines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1079. P. 012088. DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012088
2. Semenova A.V., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Ustimenko A.S., Turuk P.A., Rigin V.E., Germanova I.A. Optimization design of the elbow draft tube of the hydraulic turbine IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1079. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012028
3. Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А., Семенова А.В., Устименко А.С., Ригин В. Е. Многоцелевая оптимизация формы отсасывающей трубы гидротурбины / Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции, 1 июля 2022 г. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - 336с.

Аннотация

Разработан параллельный вычислительный код для расчета течения жидкости во всем проточном тракте гидротурбины. Программная реализация обменов универсальна по отношению к топологии блочно-структурированной сетки в проточном тракте, что позволяет использовать ее для различных типов турбин. Разработаны постановки задачи, алгоритмы и программный инструментарий для многоцелевой оптимизации формы отсасывающей трубы гидротурбины. В ходе решения ряда тестовых задач показано, что оптимизация отсасывающей трубы позволяет поднять КПД современных гидротурбин на 0.15-0.3%, либо уменьшить заглубление трубы до 20% без ухудшения КПД.