

Отчет об использовании вычислительных ресурсов кластера НГУ за 2014 г. (учетные записи `hpcastra`, `ayavdyushenko`, `aelyutov`)

Тема: Численное моделирование течений и оптимизация формы проточного тракта гидравлических турбомашин

Организация: Институт вычислительных технологий СО РАН

Состав коллектива:

- 1) Авдюшенко Александр Юрьевич (к.ф.-м.н, нс ИВТ СО РАН)
- 2) Астракова Анна Сергеевна (инженер-исследователь, ассистент преподавателя НГУ)
- 3) Лютов Алексей Евгеньевич (студент ММФ НГУ, 1 курс магистратуры)
- 4) Чирков Денис Владимирович (к.ф.-м.н, нс ИВТ СО РАН, старший преподаватель НГУ)
- 5) Черный Сергей Григорьевич (д.ф.-м.н, зав. лаб. ИВТ СО РАН, профессор НГУ)

Задача 1. Ускорение сходимости итераций при расчете нестационарных задач течения несжимаемой жидкости. Известно, что алгоритм искусственной сжимаемости с приближенной LU-факторизацией неявного оператора и явной реализацией краевых условий требует большого числа итераций по псевдовремени для сходимости на каждом шаге по времени t . С использованием этого алгоритма расчет практически важных трехмерных нестационарных задач (число узлов сетки порядка $5 \cdot 10^5 - 10^7$) занимает от одной до нескольких недель. Необходимо сократить время счета за счет применения альтернативных способов обращения неявного оператора и распараллеливания алгоритма.

В 2014 г. разработан численный алгоритм с обращением нефакторизованного неявного оператора, расширенного добавлением в него неявной аппроксимации краевых условий. За счет отсутствия погрешности факторизации такой метод с точностью до отбрасывания смешанных производных и членов высокого порядка при аппроксимации по пространству совпадает с методом Ньютона, дающим второй порядок сходимости при $\Delta\tau \rightarrow \infty$. Ранее авторами было показано, что такой подход позволяет в десятки и даже сотни раз сократить число итераций при решении стационарных и нестационарных задач динамики идеальной жидкости. В 2014 г. изучена применимость данного подхода для ускорения сходимости при расчете вязких (ламинарных и турбулентных) стационарных и нестационарных течений. Для точного решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности, возникающей в алгоритме с нефакторизованным неявным оператором, использовался алгоритм PARDISO из библиотеки Intel MKL, специально разработанный для решения СЛАУ с сильно разреженными матрицами.

В ходе исследования показано, что при решении нестационарных задач число итераций на каждом шаге по времени в нефакторизованном методе уменьшается примерно в 30 раз (см. рис. 1,а). Несмотря на то, что на выполнение PARDISO затрачивается в несколько раз больше времени, чем на обход области в методе приближенной LU-факторизации, общее время счета для нефакторизованного алгоритма в 4-5 раз меньше, чем для LU (рис. 1,б).

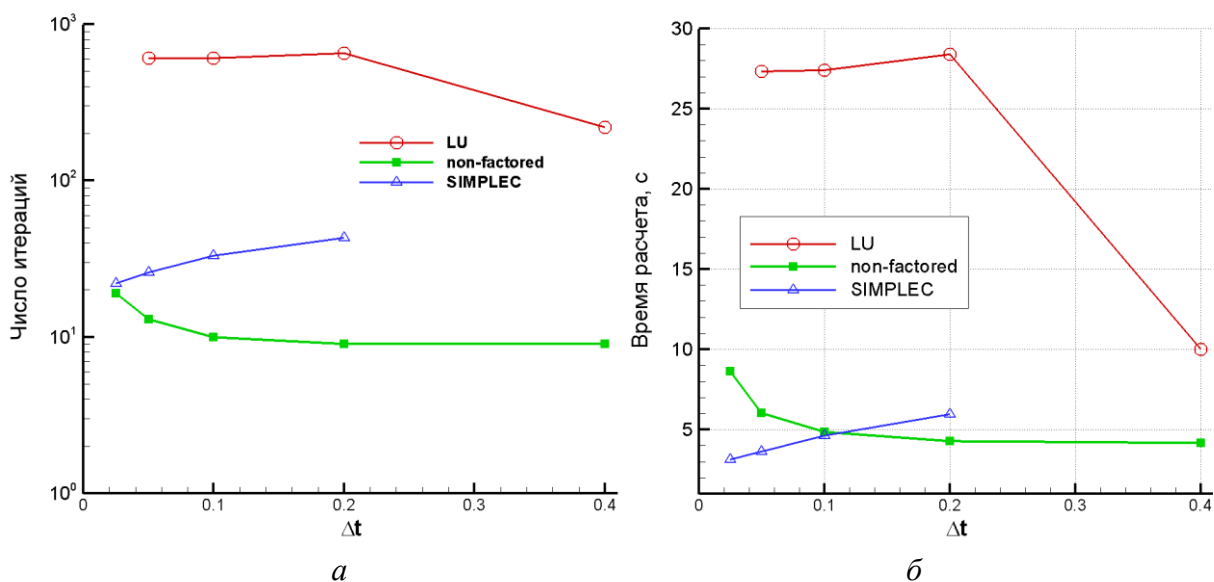


Рис. 1. Сравнение скорости сходимости (а) и времени счета (б) базового метода LU-факторизации и нефакторизованного метода с неявными краевыми условиями (non-factorized) на нестационарной задаче обтекания квадрата ($Re=100$).

Существенный резерв для ускорения счета нестационарных задач предоставляет распараллеливание алгоритма, как на явном, так и неявном полушагах. Для базовой схемы с LU-факторизацией и нефакторизованной схемы с неявными краевыми условиями реализовано гибридное MPI+OpenMP распараллеливание. В этом подходе для обмена данными между различными блоками расчетной области используется стандарт MPI, а для ускорения счета внутри одного блока используется распараллеливание над общей памятью по стандарту OpenMP. Применение распараллеленной схемы LU-факторизации позволило сократить время счета в 4 раза для задачи обтекания цилиндра с числом Рейнольдса $Re=100$ и в 7 раз на трехмерной задаче о пульсациях кавитационной полости за рабочим колесом гидротурбины при расчете на 12-ядерном узле кластера НГУ.

Задача 2. Исследование чувствительности 1D-3D модели автоколебаний на гидроэлектростанциях к физическим и численным параметрам. В 2012-2013 годах авторами разработана модель продольных автоколебаний давления в проточных трактах гидроэлектростанций, основанная на одновременном решении 1D уравнений гидроакустики для области напорного водовода и 3D уравнений Навье-Стокса двухфазной кавитирующей среды «жидкость-пар» для области гидротурбины. С использованием распараллеленного метода LU-факторизации в 2014 году исследована чувствительность этой модели к сгущению 3D сетки, шагу по времени и величине плотности пара. На рис. 2 показано влияние этих параметров на пульсации давления в потоке для модели кавитации Зварта-Гербера-Беламри (ZGB), а на рис. 3 – для модели кавитации Сингхала. Из рисунков видно, что сгущения базовой сетки (Mesh 1) и шага по времени, равного $1/24$ периода вращения рабочего колеса, достаточно для описания явления. В то же время видно сильное влияние модели кавитации. Причем в модели ZGB плотность пара влияет слабо, в то время как в модели Сингхала уменьшение плотности пара с 10 кг/м^3 до 2 кг/м^3 приводит к существенному снижению амплитуды пульсаций, приближая ее к полученной по модели ZGB. Таким образом, для практических расчетов автоколебательных процессов на ГЭС рекомендуется использование модели кавитации ZGB. На рис. 4. показана

эволюция формы кавитационной полости в отсасывающей трубе гидротурбины, полученная в расчетах по модели ZGB.

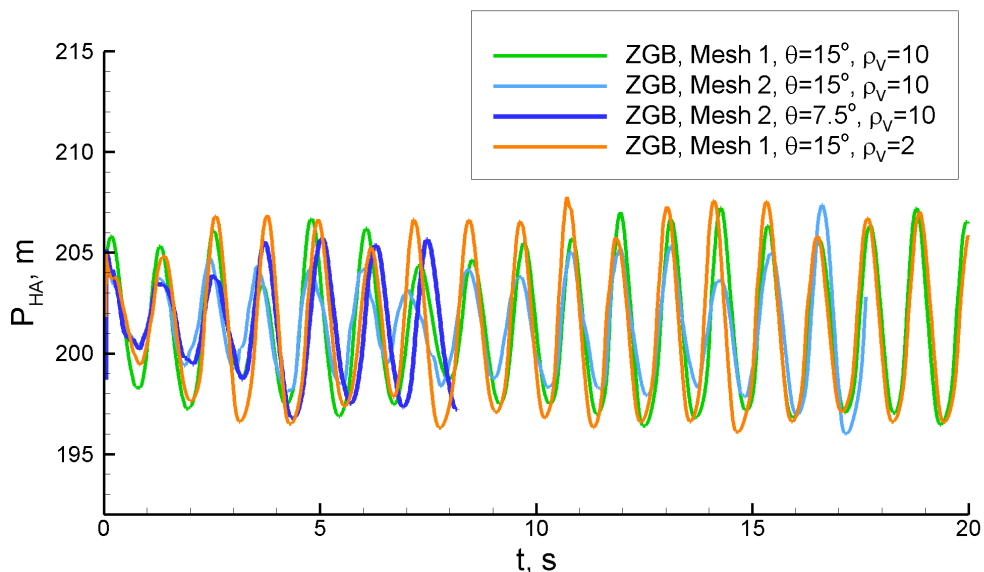


Рис. 2. Пульсации давления в направляющем аппарате. Чувствительность к размеру сетки, шагу по времени и плотности пара в модели кавитации ZGB.

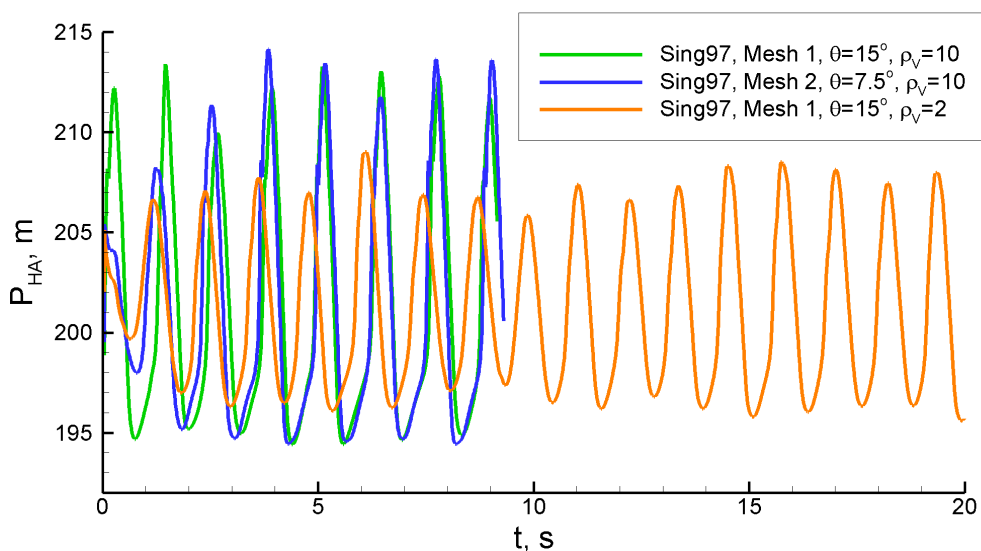


Рис. 3. Пульсации давления в направляющем аппарате. Чувствительность к размеру сетки, шагу по времени и плотности пара в модели кавитации Сингхала.

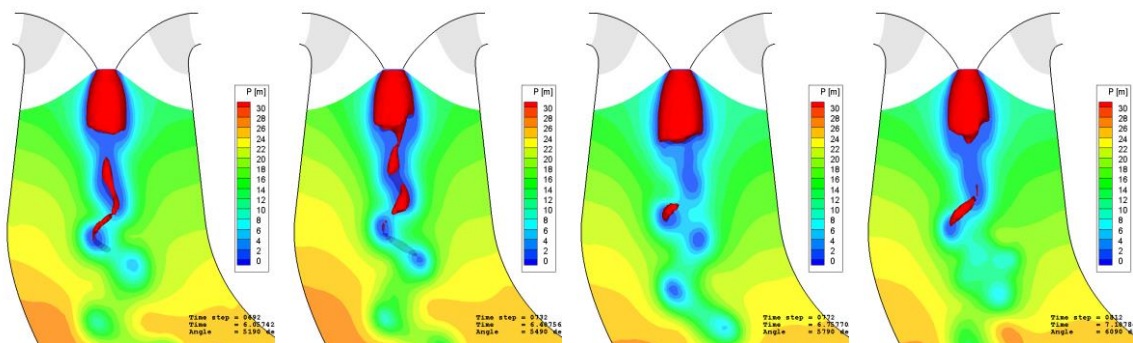


Рис. 4. Изолинии давления в отсасывающей трубе гидротурбины в режиме полной нагрузки. Красным цветом показана поверхность паровой каверны.

Задача 3. Оптимизация рабочего колеса и отсасывающей трубы гидротурбины.

В 2014 г. разработана методика одновременной многорежимной оптимизации формы рабочего колеса (РК) и отсасывающей трубы (ОТ) гидравлической турбины. До сих пор в мире не было публикаций, где бы одновременно варьировалась форма РК и ОТ. Тем не менее, это очень важная постановка, поскольку она позволяет расширить множество допустимых геометрий проточного тракта и находить такие комбинации форм РК и ОТ, которые не удастся рассмотреть при их отдельных вариациях. Немаловажно, что данная постановка позволяет учитывать взаимодействие между РК и ОТ, а значит получаемые течения в гидротурбине – реализуемы (например, в отличие от оптимизации профиля скорости на входе в ОТ). Показано, что одновременная оптимизация РК и ОТ позволяет получить КПД выше, чем оптимизация одного РК, при этом прирост средневзвешенного КПД вследствие одновременной оптимизации РК и ОТ составляет около 0.3% по сравнению с оптимизацией одного РК, рис. 5. Прирост КПД достигнут за счет минимизации возвратных течений в конусе отсасывающей трубы (рис. 6) и, как следствие, уменьшением потерь в ней.

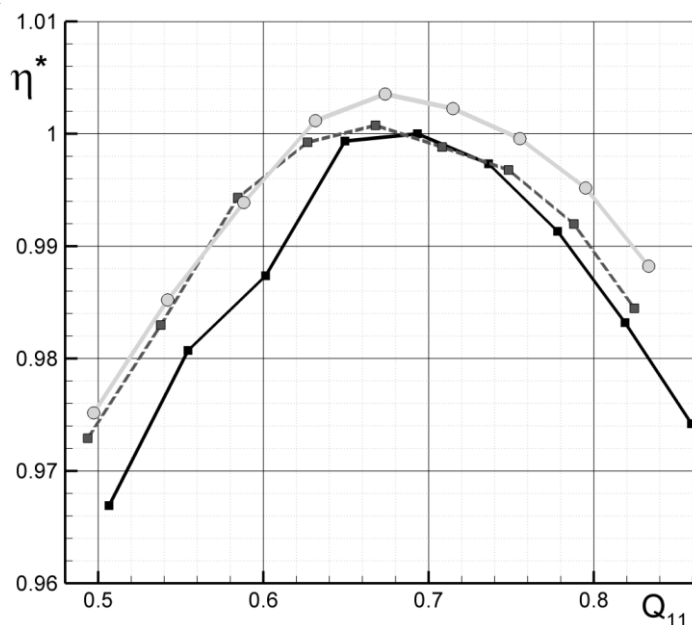
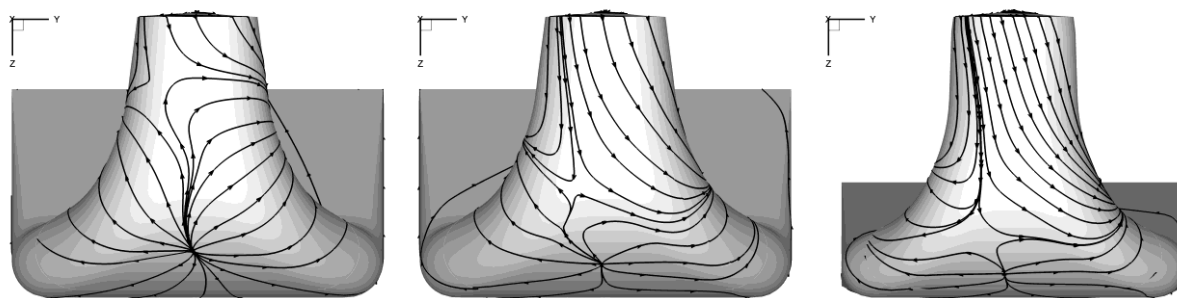


Рис. 1. Зависимость относительного КПД от расхода: исходная геометрия (—■—), геометрия, полученной вариацией только РК (---■---), и геометрия, полученная вариацией РК и ОТ (—○—).



исходная геометрия

вариация РК

вариация РК и ОТ

Рис. 2. Линии тока вдоль задней стенки ОТ.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы. Решаемые задачи моделирования нестационарных трехмерных течений и оптимизации формы проточного тракта традиционно задачам, требующим больших вычислительных ресурсов. В настоящее время подобные задачи можно успешно решать только с привлечением высокопроизводительных многопроцессорных ЭВМ. Авторы существенно используют потенциал кластера – все вычислительные алгоритмы распараллелены и выполняются на десятках вычислительных ядрах. Задача многоцелевой оптимизации, требующая перебора и анализа течения для нескольких тысяч вариантов геометрии проточного тракта, на 120 ядрах решается в течении 3-5 суток, что эквивалентно нескольким месяцам расчета на персональном компьютере.

Публикации.

Центральная печать

1. Panov L. V., Chirkov D. V., Cherny S. G., Pylev I. M. Numerical simulation of pulsation processes in hydraulic turbine based on 3D model of cavitating flow // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. Vol. 21, No. 1. pp. 31-43.
Индексы цитирования: Thomson Reuters (impact factor 0.3), SCOPUS, РИНЦ.
2. Астракова А.С., Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В. Численные методы оптимизационного проектирования проточных частей гидротурбин // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 20-39.
Индексы цитирования: РИНЦ.
3. Семёнова А.В., Чирков Д.В., Лютов А.Е. Целевые функционалы при оптимизации рабочего колеса поворотной-лопастной гидротурбины // Научно-технические ведомости СПбГУ, раздел «Энергетика». 2014. – в. 3 (202). – С. 97-106.
Индексы цитирования: РИНЦ.
4. Семенова А.В., Скорospelов В.А., Чирков Д.В. Верификация численного прогнозирования энергетических характеристик поворотной-лопастных гидротурбин // Тяжелое машиностроение. – 2014. – №7. – С. 29-33.
Индексы цитирования: РИНЦ.

Материалы международных конференций

1. Chirkov D., Panov L., Cherny S., Pylev I. Numerical simulation of full load surge in Francis turbines based on three-dimensional cavitating flow model // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Montreal, Canada, September 22-26). – 2014. – 8 p.
Индексы цитирования: SCOPUS.
2. Semenova A., Chirkov D., Lyutov A., Cherny S., Skorospelov V., Pylev I. Multi-objective shape optimization of runner blade for Kaplan turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Montreal, Canada, September 22-26). – 2014. – 8 p.
Индексы цитирования: SCOPUS.