

## 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).

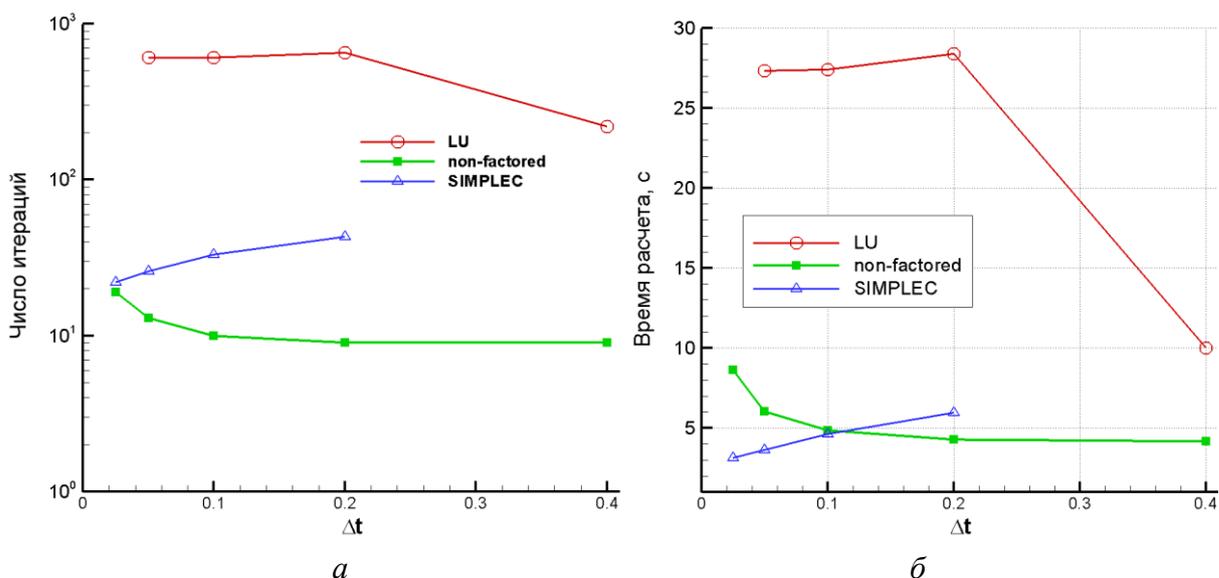


Рис. 1. Сравнение скорости сходимости (а) и времени счета (б) базового метода LU-факторизации и нефакторизованного метода с неявными краевыми условиями (non-factorized) на нестационарной задаче обтекания квадрата ( $Re=100$ ).

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-Герберера-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  $10 \text{ кг/м}^3$  до  $2 \text{ кг/м}^3$  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.

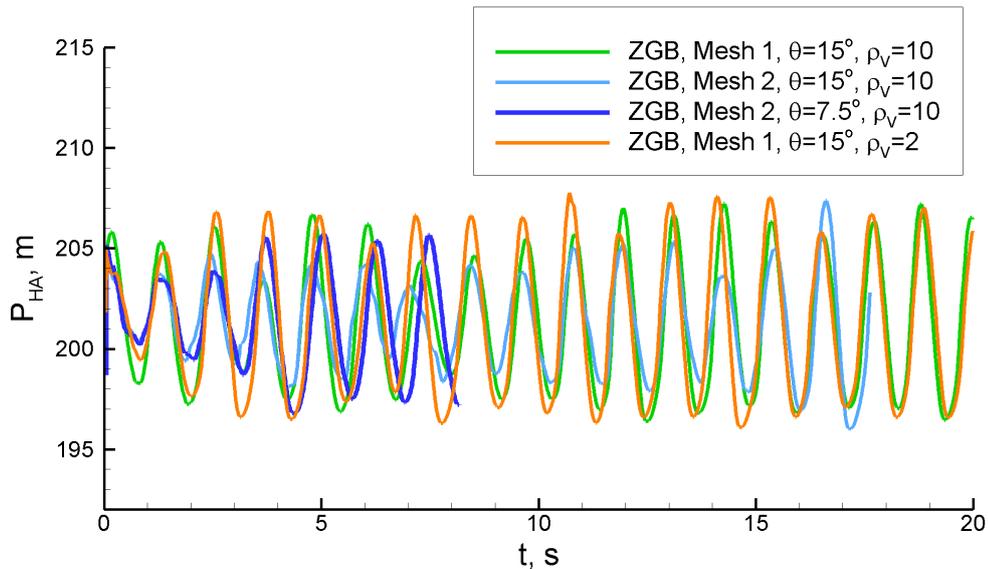


Рис. 2. Пульсации давления в направляющем аппарате. Чувствительность к размеру сетки, шагу по времени и плотности пара в модели кавитации ZGB.

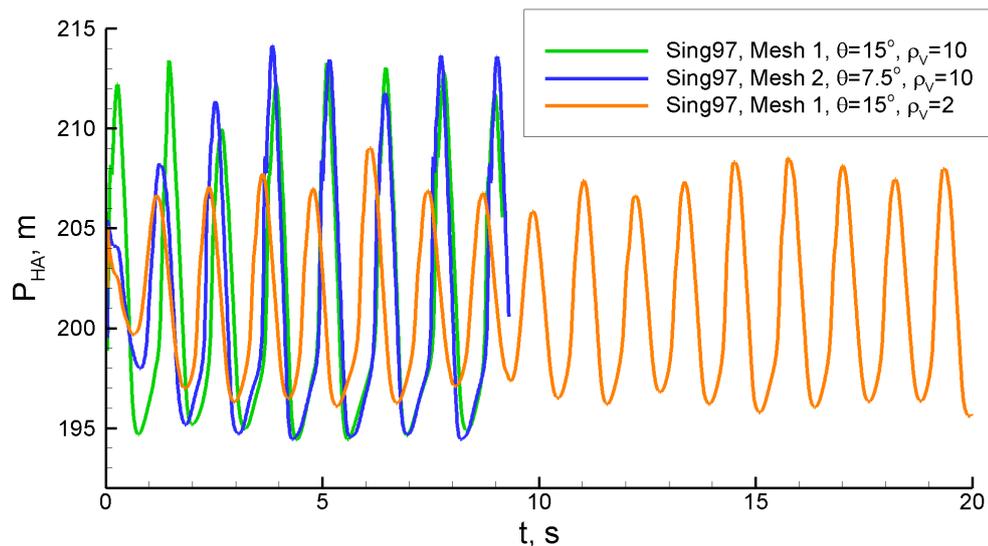


Рис. 3. Пульсации давления в направляющем аппарате. Чувствительность к размеру сетки, шагу по времени и плотности пара в модели кавитации Сингхала.

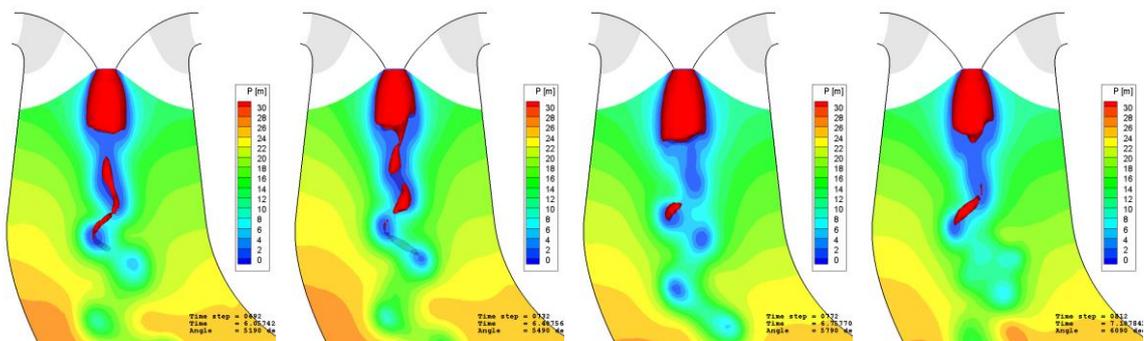


Рис. 4. Изолинии давления в отсасывающей трубе гидротурбины в режиме полной нагрузки. Красным цветом показана поверхность паровой каверны.

**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.

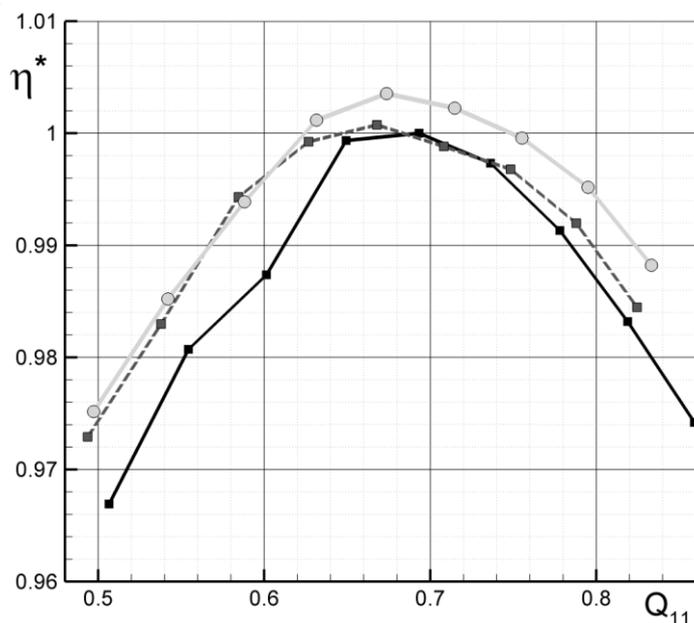
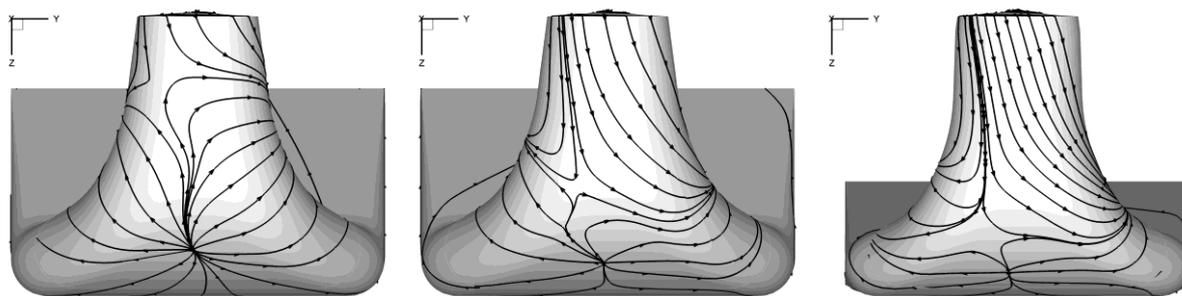


Рис. 1. Зависимость относительного КПД от расхода: исходная геометрия (—■—), геометрия, полученной вариацией только РК (---■---), и геометрия, полученная вариацией РК и ОТ (—○—).



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., Скороспелов 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.