

Тема работы:

Численное моделирование автоколебаний давления в проточных трактах ГЭС и прогнозирование зоны устойчивой работы гидротурбины

Состав коллектива:

Чирков Денис Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с ИВТ СО РАН;
Черный Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н, директор ИВТ СО РАН;
Щербаков Павел Константинович, аспирант ИВТ СО РАН

Информация о гранте:

Государственное задание ИВТ СО РАН. Тема «Разработка и исследование новых элементов вычислительной технологии решения фундаментальных и прикладных задач аэро-, гидро- и волновой динамики». Рук. С. Г. Черный.

Научное содержание работы:***1. Постановка задачи***

Разработка вычислительной модели, численного метода и комплекса программ для численного моделирования колебаний давления в проточном тракте ГЭС, вызванных работой гидроагрегата в режимах, далеких от оптимального. Модель должна учитывать кавитационные явления и взаимодействие пульсаций давления в проточной части гидроагрегата с течением в длинном напорном водоводе.

2. Современное состояние проблемы

На многих режимах работы гидротурбины возникают кавитационные явления – парообразование в областях потока, где давление ниже давления насыщенных паров воды при данной температуре. Наличие водяного пара меняет картину течения, снижает КПД установки. Но, более важно, движущаяся среда становится существенно сжимаемой, что приводит к изменению гидроакустических свойств системы «напорный водовод – гидротурбина». Гидравлическая система «напорный водовод – гидротурбина» допускает продольные колебания давления и расхода. Экспериментальные данные показывают, что наличие в отсасывающей трубе обширных областей, заполненных паром, часто является причиной гидродинамической неустойчивости течения. В этом случае формируются крайне нежелательные автоколебания давления и расхода, распространяющиеся вдоль всего проточного тракта гидроэлектростанции.

При моделировании переходных процессов и продольных колебаний в гидравлической системе гидроэлектростанции существенным является учет распространения волн в напорном водоводе и отсасывающей трубе турбины. Сейчас для исследования этих явлений в основном применяются полностью одномерные (1D) гидроакустические модели [1,2,3]. В них проточный тракт гидроэлектростанции представляется последовательностью труб различного диаметра, а сама турбина - точечным источником или стоком давления. Одномерная модель позволяет объяснить основные физические механизмы, отвечающие за распространение, усиление и демпфирование колебаний давления. Однако количественное описание этих явлений в рамках 1D модели до сих пор проблематично, поскольку результаты прогноза решающим образом зависят от эмпирических констант, используемых в модели. В частности, одним из входных данных является скорость распространения возмущений в отсасывающей

трубе гидротурбины. В реальных условиях она существенным образом зависит от концентрации и характера распределения в ней газовой фазы. Кроме этого, 1D модель не дает представления о трехмерной структуре потока.

В пакетах программ гидродинамических расчетов ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR CCM+, OpenFOAM реализованы алгоритмы для расчета динамики многофазных смесей, в том числе с учетом фазовых превращений. Однако в работах [4,5,6] отмечают трудности с выполнением закона сохранения массы при расчетах нестационарных кавитационных течений с помощью этих пакетов. Нарушение консервативности, в частности, не позволило авторам [5] применить ANSYS CFX для исследования автоколебательных процессов в закрученных кавитационных течениях. Кроме этого, в указанных пакетах программ проблематичен учет взаимодействия течения в основной проточной части гидродинамической установки с длинными подводными и отводящими каналами, обладающими своими гидроакустическими свойствами.

Фактически пионерской в этом направлении была работа [7] настоящих авторов. В ней совместно моделировалось течение в напорном водоводе и в гидравлической турбине. Позднее предложенная в ней 1D-3D модель была распространена на случай кавитационных течений в проточном тракте [8]. С помощью этой модели нам удалось успешно смоделировать автоколебания, связанные с гидравлической неустойчивостью кавитационного течения.

- [1] Dörfler P. Evaluating 1D models for vortex-induced pulsation in Francis turbines // 3rd Int. Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems (Brno, Czech Republic). 2009. Vol. 2. P. 315-324.
- [2] Nicolet C. Hydroacoustic Modelling and Numerical Simulation of Unsteady Operation of Hydroelectric Systems. Ph. D. Thesis EPFL No. 3751. 2007.
- [3] Берлин В. В., Муравьев О. А. Исследование резонансных явлений в напорных водоводах и отсасывающих трубах ГЭС // Гидротехническое строительство. 2012. № 7. С. 46-58.
- [4] Dörfler P. K., Keller M., Braun O. Francis full-load surge mechanism identified by unsteady 2-phase CFD // 25th IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems (Timisoara, Romania). 2010.
- [5] Chen C., Nicolet C., Yonezawa K., Farhat M., Avellan F., Miyagawa K., Tsujimoto Y. Experimental study and numerical simulation of cavity oscillation in a conical diffuser // Int. J. of Fluid Machinery and Systems. 2010. Vol. 3, No. 1. P. 91-101.
- [6] Moessinger P., Conrad P. Jung A. Transient two-phase CFD simulation of overload pressure pulsation in a prototype sized Francis turbine considering the waterway dynamics // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.
- [7] Cherny S.G., Chirkov D.V., Bannikov D.V., Lapin V.N., Skorospelov V.A., Eshkunova I.F., Avdushenko A.U. 3D numerical simulation of transient processes in hydraulic turbines // 25th IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems (Timisoara, Romania). 2010.
- [8] Chirkov D., Avdyushenko A., Panov L., Bannikov D., Cherny S., Skorospelov V., Pylev I. CFD simulation of pressure and discharge surge in Francis turbine at off-design conditions // Proceedings of IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems (Beijing, China), 2012, 8 p.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Для решения поставленной задачи взята математическая модель, состоящая из 1D уравнений гидроакустики в напорном водоводе и 3D уравнений Навье-Стокса двухфазной кавитирующей среды «жидкость-пар» в проточном тракте гидротурбины. Обе системы уравнений решаются совместно с передачей данных на границе «водовод-турбина».

1. Смесь «жидкость - пар» рассматривает как односкоростная гомогенная среда, в которой все фазы имеют общие скорость и давление. Плотность и вязкость среды в каждой точке потока определяется как сумма плотностей отдельных фаз, умноженных на объемную долю фазы. Для описания фазовых превращений, то есть процессов испарения и конденсации использована модель Зварта – Гербера – Беламри ZGB, основанная на упрощенном уравнении Релея-Плессета.

2. Для решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в геометрически сложных проточных трактах турбомашин использован собственный численный алгоритм, основанный на методе искусственной сжимаемости и неявном методе конечных объемов 2-го порядка аппроксимации по времени и пространству.

3. Для расчета течения в системе «напорный водовод – гидротурбина» применен 1D-3D подход, в котором трехмерные уравнения Навье-Стокса в самой турбине решаются одновременно с одномерными уравнениями гидроакустики в области напорного водовода. Этот подход обеспечивает корректные граничные условия на входе в область турбины.

4. Для ускорения нестационарных трехмерных расчетов использован подход гибридного MPI+OpenMP распараллеливания.

4. Полученные результаты

Разработанная модель и численный метод применены для расчета автоколебаний на реальной гидроэлектростанции на режиме повышенной мощности. На рис. 1. показана эволюция формы кавитационной полости в отсасывающей трубе гидротурбины за период колебаний. Исследована чувствительность модели к сгущению сетки, шагу по времени и величине плотности пара. На рис. 2 показано влияние этих параметров на пульсации давления в потоке для модели кавитации ZGB. Из рисунков видно, что автоколебания могут быть рассчитаны уже на достаточно грубой пространственной сетке с шагом по времени, равным 1/24 периода вращения рабочего колеса. На рис. 3 и 4 показано, что для моделирования автоколебаний достаточно использовать упрощенную циклическую постановку. Исследовано влияние расхода и числа Тома на частоту и амплитуду колебаний давления и мощности гидротурбины, рис. 5. На рис. 6 показано сравнение с экспериментом амплитуды колебаний мощности гидротурбины от средней мощности.

С построенной численной модели исследованы различные способы устранения пульсаций давления на режимах повышенной мощности. А именно, исследовано влияние вдува воздуха под рабочее колесо, влияние формы конуса обтекателя РК, а также формы лопасти на амплитуду и частоту автоколебаний. В частности, показано, что форма обтекателя рабочего колеса не влияет на интенсивность автоколебаний. С другой стороны, за счет выбора соответствующей формы лопасти можно полностью устранить пульсации давления в зоне повышенной мощности без ухудшения КПД турбины, рис. 7. Найдена закономерность между профилем скорости на выходе из рабочего колеса и

интенсивностью автоколебаний, которая может быть использована при проектировании перспективных рабочих колес гидротурбин.

Таким образом, разработанная модель учитывает ключевые факторы, определяющие частоту и амплитуду пульсаций в проточном тракте ГЭС, при этом не содержит эмпирических параметров, как известные полностью одномерные модели. Хорошее согласование с экспериментальными данными позволяет использовать данную модель и созданный на ее базе программный комплекс в практике проектирования гидротурбинных установок. Показано, что амплитуда пульсаций существенным образом зависит от формы рабочего колеса. Предложена методика проектирования формы рабочего колеса, позволяющая устранить автоколебания на режимах повышенной мощности при сохранении высокого КПД турбины, тем самым расширить зону устойчивой работы гидравлической турбины.

5. Иллюстрации, визуализация результатов

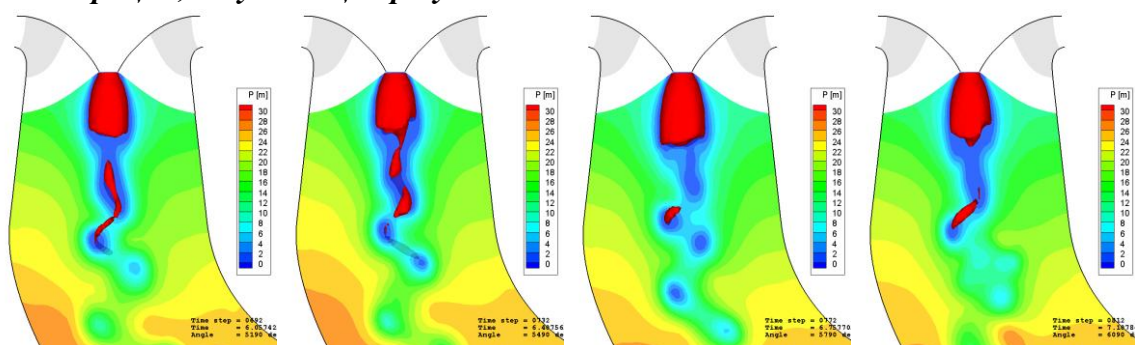


Рис. 1. Изолинии давления в отсасывающей трубе гидротурбины в режиме повышенной нагрузки. Красным цветом показана поверхность паровой каверны.

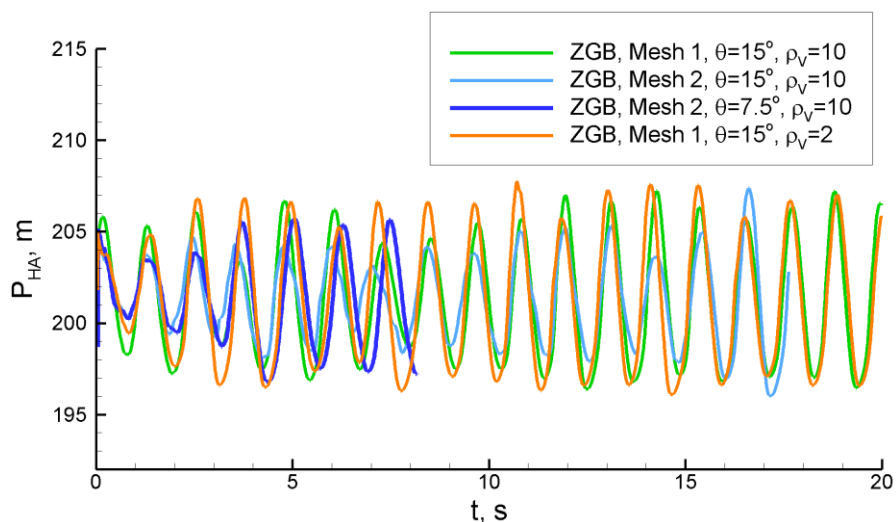


Рис. 2. Пульсации давления в направляющем аппарате.

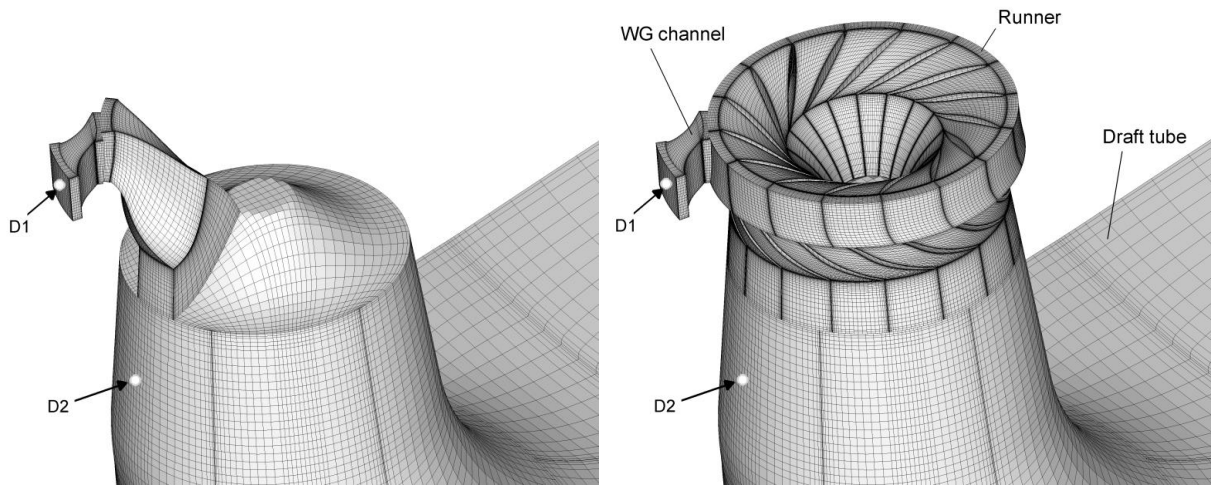


Рис. 3. Расчетные области и сетки

Слева – постановка 1 (1 канал НА, 1 канал РК, вся ОТ, шаг по времени $\theta=15^\circ$).
 Слева – постановка 2 (1 канал НА, всё РК, вся ОТ, шаг по времени $\theta=3.75^\circ$).

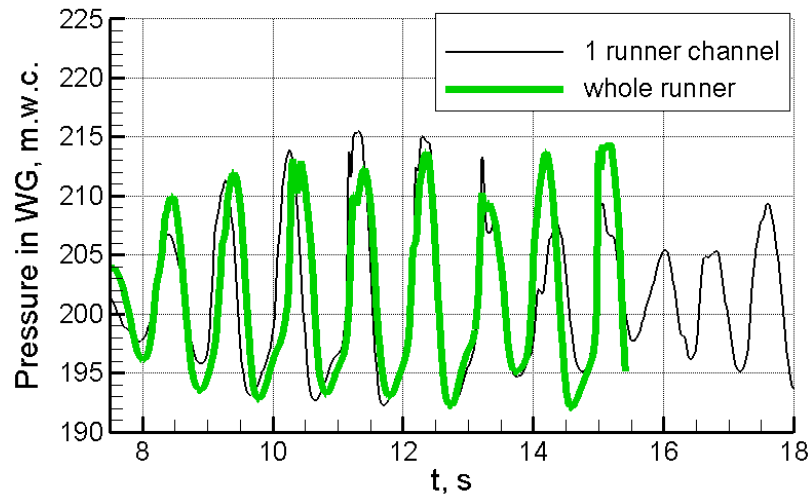


Рис. 4. Сравнение пульсаций давления в направляющем аппарате (точка D1) в постановках 1 и 2.

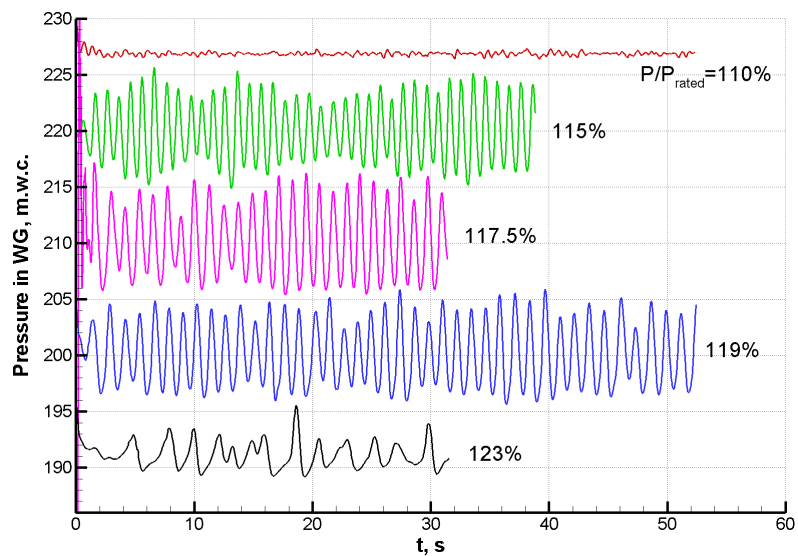


Рис. 5. Пульсации давления перед направляющим аппаратом в зависимости от мощности турбины.

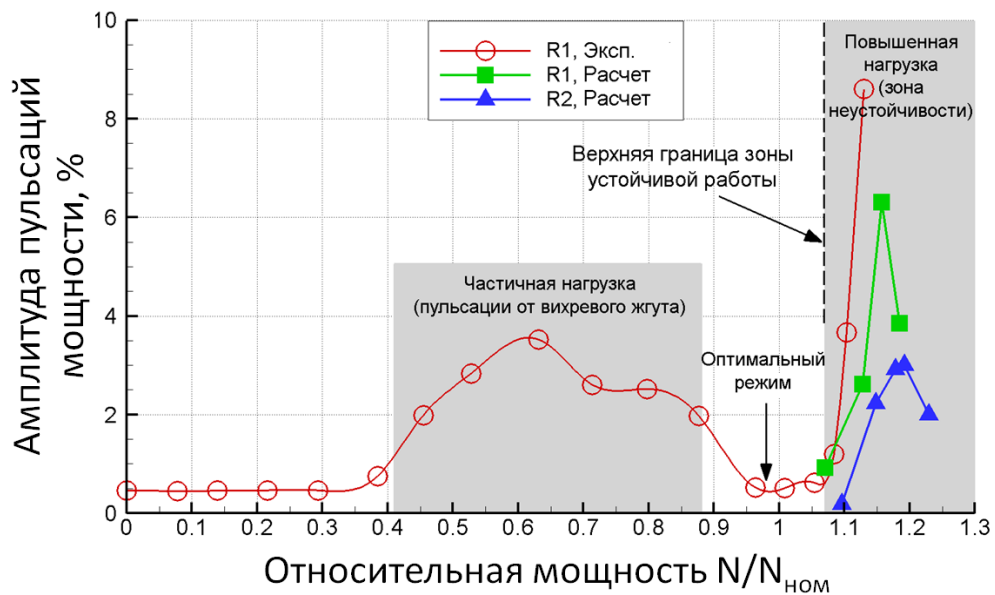


Рис. 6. Зависимость пульсаций мощности от режима работы ГЭС. R1 – турбина с исходным рабочим колесом. R2 – турбина с модернизированным рабочим колесом.

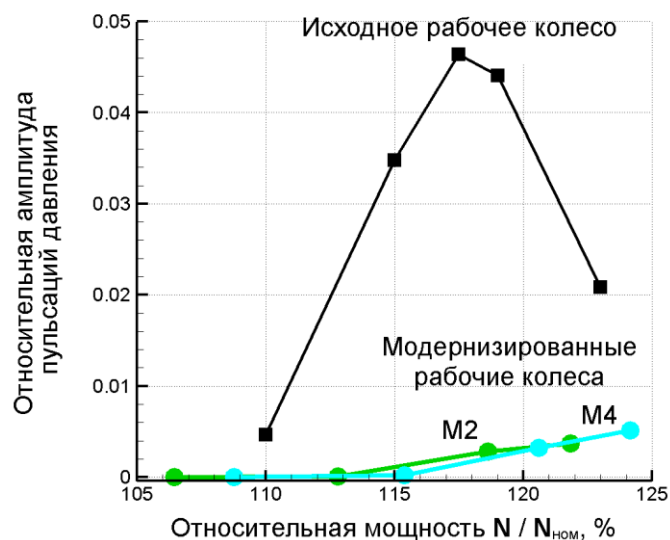


Рис. 7. Зависимость амплитуды пульсаций давления от мощности для исходного рабочего колеса и рабочих колес, модернизированных по представленной методике (M2 и M4).

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Проведение нестационарных расчетов трехмерных течений в разумное время невозможно без распараллеливания счета на десятки процессоров. Поэтому использование кластера является определяющим для успешного достижения целей работы.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

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. ISSN: 0869-8643.

2. **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.
3. **Chirkov D., Cherny S., Scherbakov P., Zaharov A.** Evaluation of range of stable operation of hydraulic turbine based on 1D-3D model of full load pulsations // Proceedings of 6th IAHR Working Group «Cavitation and dynamic problems», 28 June-3 July 2015, Ljubljana, Slovenia: Faculty of Technologies and Systems. 2015. P. 177–184., ISBN 978-961-6770-31-6
4. **Chirkov D., Scherbakov P., Cherny S., Zakharov A., Skorospelov V. and Turuk P.** Mitigation of self-excited oscillations at full load: CFD analysis of air admission and effects of runner design // 28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Grenoble, France, July 4-8). – 2016. – 10 p.
5. **Chirkov D., Cherny S., Shcherbakov P., Skorospelov V., Zakharov A.** Three-dimensional simulation of full load instability in Francis turbines // *Journal of Hydraulic Research*. 2019. Vol. **57** (5). pp. 623-634.