

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

Аннотация.

Моделирование кавитационных режимов в гидротурбинах играет ключевую роль в повышении их эффективности и надежности. Кавитация — процесс образования и схлопывания паровых пузырьков в жидкости может вызывать эрозию рабочих лопаток, снижение КПД и увеличение вибраций. Применение численных методов позволяет предсказать развитие кавитации, оптимизировать конструкцию турбин и продлить их срок службы. Анализ этих процессов способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению устойчивости гидроэнергетических установок. Развитие точных моделей кавитации критично для разработки современных высокоэффективных турбин и обеспечения их безопасной работы.

Тема работы.

Численное моделирование кавитационных режимов в гидротурбине

Состав коллектива.

- Щербаков Павел Константинович, младший научный сотрудник., Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий.
- Чирков Денис Владимирович, старший научный сотрудник, Институт Теплофизики СО РАН.
- Скороспелов Владимир Анатольевич, старший научный сотрудник, Институт математики СО РАН.

Информация о гранте.

Отсутствует

Научное содержание работы.

Постановка задачи.

Одним из важнейших критериев при разработке новых лопастных систем является кавитационное качество. Важно, чтобы при работе в режимах, близких к кавитационному коэффициенту станции $\sigma_{ст}$ не происходило падение КПД. Более того, хотелось бы получить такую лопасть, у которой падение КПД наступало при наименьшем значении σ . Таким образом, требуется найти такую форму лопасти рабочего колеса гидротурбины, при которой снижаются локальные зоны пониженного давления, способствующие образованию кавитации, при сохранении высокой гидродинамической эффективности.

Современное состояние проблемы.

Современное состояние разработки лопастных систем гидротурбин с учетом кавитационного качества связано с необходимостью повышения их эффективности и надежности. Кавитация остается одной из ключевых проблем. Развитие вычислительной гидродинамики (CFD) позволило улучшить точность моделирования кавитационных процессов и прогнозировать их влияние на работу турбины. Современные методы оптимизации, включая генетические алгоритмы и машинное обучение, помогают находить формы лопастей, снижающие риск кавитации.

Дополнительно используются новые материалы и покрытия, устойчивые к кавитационной эрозии. Однако вызовами остаются высокая вычислительная сложность моделей, необходимость точного учета нестабильных течений и адаптация расчетных методик к реальным эксплуатационным условиям. Ведутся исследования по интеграции многофизических моделей, объединяющих гидродинамические, механические и тепловые процессы. Таким образом, совершенствование лопастных систем требует комплексного подхода, объединяющего численное моделирование и экспериментальные исследования.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для моделирования течения, предлагается использовать следующую модель движения смеси «жидкость – пар – газ», учитывающую сжимаемость фаз и фазовые превращения. При этом, плотность жидкости принимается постоянной, а плотность газа меняется согласно следующему закону:

$$\rho = \left(\frac{P}{K_G}\right)^\gamma \alpha_G + \rho_L(1 - \alpha_G)$$

В этом случае плотность смеси зависит не только от объемных долей компонент, но также принимается во внимание сжимаемость газовой фазы.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla \hat{p} = \text{div}(\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{f},$$

$$\frac{\partial \alpha_G}{\partial t} + \text{div}(\alpha_G \mathbf{v}) = 0.$$

В качестве численного метода используется MUSCL схема третьего порядка для аппроксимации конвективных слагаемых. В областях больших градиентов объемной доли жидкости порядок схемы снижается до первого, что повышает устойчивость схемы. Вязкие члены аппроксимируются центрально-разностной схемой второго порядка точности.

Полученные результаты.

На рис. 1 показаны кавитационные характеристики двух различных лопастей. Видно, что падение КПД для *blade_2* происходит при меньшем значении σ , соответственно, с точки зрения кавитации данная лопасть предпочтительнее.

Также на рис. 1 показана тыльная сторона лопасти при $\sigma = \sigma_{кр}$. Синим цветом показана область, в которой давление меньше, чем давление парообразования.

Видно, что в данном режиме работы часть тыльной стороны лопасти будет занимать развитая кавитация. Из инженерных расчетов известно, что срыв КПД происходит в том случае, если относительная площадь кавитации составляет около 20-30% от площади всей поверхности тыльной стороны лопасти:

$$A_{cav} = \frac{S_{cav}}{S_{suc}},$$

где S_{cav} – площадь области, в которой $p < p_v$, p_v – давление парообразования, S_{suc} – площадь всей тыльной стороны лопасти.

Исходя из этих соображений и проводилась оптимизация. В качестве одного из целевых функционалов использовался A_{cav} в режиме повышенной нагрузки. Таким образом, уменьшая площадь кавитации при $\sigma = \sigma_{кр}$ мы получали лопасти, у которых кавитация занимает меньшую область на тыльной стороне лопасти.

Таким образом, о кавитационном качестве лопастей можно судить исключительно по значению функционала A_{cav} , который основан на анализе распределений давления в некавитационном потоке. На рис. 3 показаны три различные лопасти, с довольно близки значениями функционала A_{cav} .

Иллюстрации, визуализации результатов.

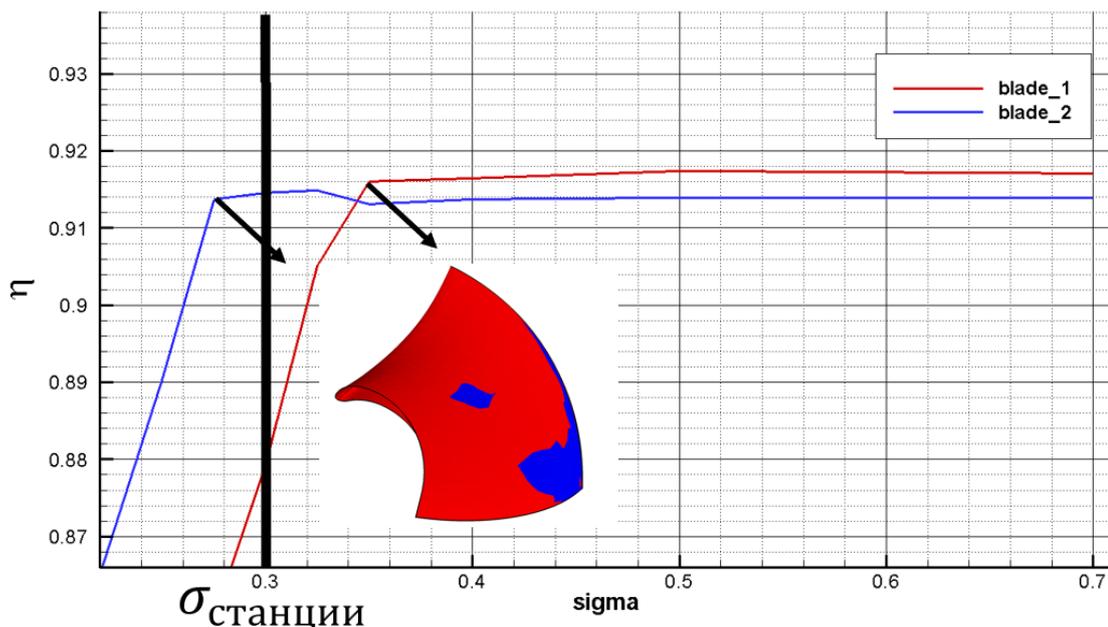


Рисунок 1. Кавитационные характеристики двух различных лопастей. Тыльная сторона лопасти при $\sigma = \sigma_{кр}$.

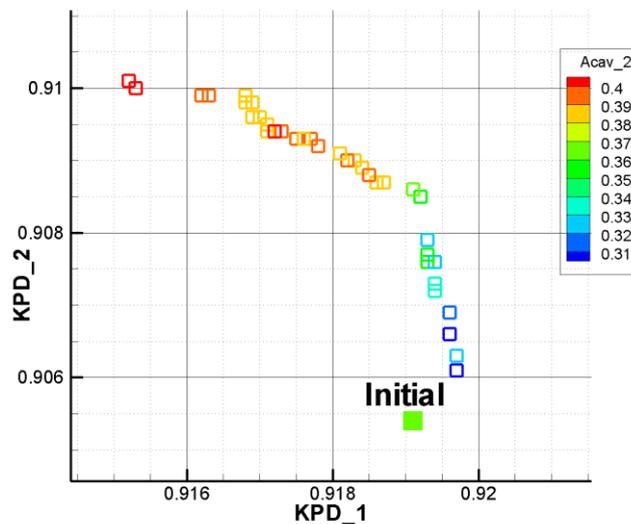


Рисунок 2. Фронт Парето, полученный в ходе оптимизации. Цветом показано значения функционала A_{cav} .

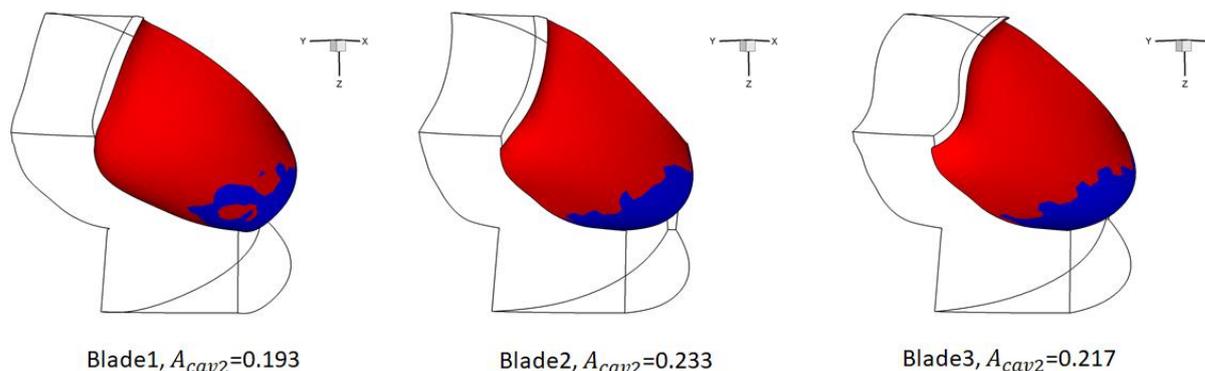


Рисунок 3. Значение функционала A_{cav} для лопастей 1-3.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

При оптимизационных расчетах в гидротурбине необходима подробная сетка, а также возможность распараллеливания. Без этого проведения качественных оптимизационных исследований не представляется возможным. Использование кластерных вычислительных ресурсов позволяет получать более точные результаты ускоренным образом, позволяя проводить несколько оптимизационных расчетов одновременно.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

Shcherbakov P. et al. Two models for calculating air injection into the hydraulic turbine //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2023. – Т. 2504. – №. 1. – С. 030112.