

Тема: «Численное моделирование щелевой кавитации в элементах проточного тракта гидротурбин»

Состав коллектива:

к.ф.-м.н., н.с. ИТ СО РАН, Гаврилов А.А.,

к.ф.-м.н., н.с. ИТ СО РАН, Сентябов А.В.

Научное содержание работы

Работа многих гидротехнических систем сопровождается кавитационными явлениями, что связано, прежде всего, с высокими скоростями движения или течения в них. К таким системам относятся гидротурбины, центробежные и осевые насосы, судовые движители и другие. Кавитация, как правило, негативным образом влияет на работу гидравлического оборудования, вызывая ухудшение его эксплуатационных характеристик и усиливая механический износ конструкций вследствие кавитационной эрозии. При выходе на сторону разрежения крылового профиля поток жидкости, протекающий через зазор, взаимодействует с основным течением и при отрыве от внешней кромки трехмерной лопасти порождает концевой вихрь, который далее распространяется вниз по потоку. При достаточно высоких скоростях давление в ядре этого вихря может падать ниже давления насыщенных паров, что приводит к вихревой кавитации.

Наиболее распространенным подходом к моделированию течений с кавитацией являются модели сплошной среды. В них двухфазная среда рассматривается состоящей из двух компонент (жидкости и пара) и имеющей непрерывное распределение плотности. Локальные свойства двухфазной среды зависят от значения объемной доли пара f_v . В основе этих моделей лежит уравнение переноса объемной или массовой доли одной из фаз, включающее источниковое слагаемое, которое описывает испарение и конденсацию. В настоящем исследовании в качестве модели кавитации была использована модель Zwart–Gerber–Belamri, основанная на упрощенном уравнении Рэлея–Плессета. В этой модели скорости парообразования и конденсации обратно пропорциональны среднему радиусу кавитационных зародышей, который принимается постоянным

Было проведено расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания двух моделей поворотных лопаток гидротурбины для угла атаки 3 и 9° и разных режимов течения. Упрощенная двумерная форма первого варианта лопатки позволила провести прямое сравнение измеренной скорости течения в пределах пограничного слоя с результатами расчетов и, тем самым, выполнить тестирование и валидацию численной модели. Было продемонстрировано, что рассчитанные распределения скорости достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным. Как при численном моделировании, так и в эксперименте для определенных условий течения были зарегистрированы периодические пульсации длины каверны и локального давления, связанные с развитием неустойчивости. Наличие тонких торцевых зазоров и осевых обтекателей у второй модели привело к появлению новых областей кавитации. Во-первых, кавитация возникает внутри самого зазора в окрестности задней кромки гидрокрыла при малом угле атаки и непосредственно за его передней кромкой при большом угле атаки. Было показано, что щелевая кавитация существует в виде паровой пленки и ее размер в существенной степени зависит от фазы развития основной каверны со стороны разрежения лопатки на нестационарных режимах течения. Во-вторых, галтели являются источником генерации достаточно интенсивных отрывных вихрей, в ядрах которых также образуются кавитационные полости. В-третьих, в расчете было обнаружено образование нестационарных кавитирующих вихрей в углах между торцом лопатки и стенкой канала. Механизм развития щелевой кавитации связан с вихревыми и отрывными явлениями. Внутри зазора происходит понижение давления в тех областях, где жидкость, протекающая через щель, отрывается от торцевой поверхности гидрокрыла с острой кромкой. В результате происходит образование отрывного пузыря внутри зазора и ускорение потока

над ним. В пределах отрывного пузыря и образуется паровая пленка, а позади него при повторном присоединении потока к торцевой поверхности лопатки формируется зазорный вихрь, в центре которого может также происходить парообразование. Кроме того, кавитация может возникать при обтекании конструктивных элементов внутри зазора, например, оси лопатки, или увлекаться в зазор со стороны поджатия или разрежения крыла за счет рециркуляционного течения.

Публикации:

1. Sentyabov A.V., Timoshevskiy M.V., Pervunin K.S. (2019) Gap cavitation in the end clearance of a guide vane of a hydroturbine: Numerical and experimental investigation // *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 28, No. 1, pp. 67–83.
<https://doi.org/10.1134/S1810232819010065>
2. Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Финников К.А. Моделирование трехмерного кавитационного обтекания гидропрофиля // *Известия РАН: Механика жидкости и газа*, 2019, № 4, с. 3–12

перевод:

Gavrilov A, Sentyabov A. Finnikov K. Numerical investigation of three-dimensional cavitating flow around a guide vane of a water turbine // *Fluid Dynamics*, 2019, Vol. 54, no. 4, pp. 441–450. DOI: 10.1134/S0015462819040050

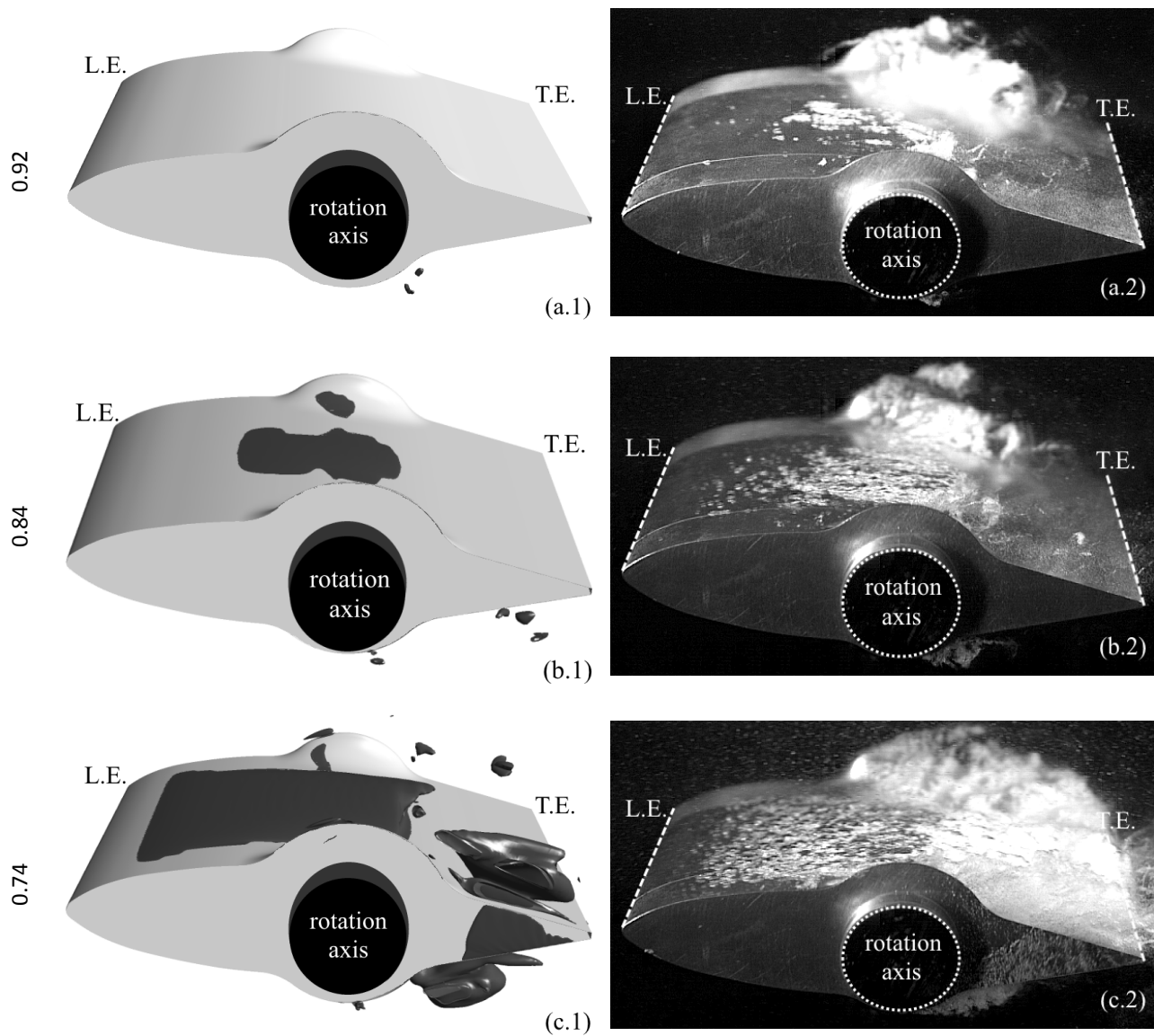


Рисунок 10. Сравнение мгновенных распределений паровой фазы в (1) расчете (визуализация изоповерхности объемной доли пара $f_v = 0.3$) и (2) эксперименте (фотографии кавитационных камер) со стороны разрежения ПЛ2 и в переднем торцевом зазоре h_1 (см. Рис. 3) при $\alpha = 3^\circ$: (a) $\sigma = 0.92$ (пузырьковая кавитация), (b) $\sigma = 0.84$ (переходный режим) и (c) $\sigma = 0.74$.

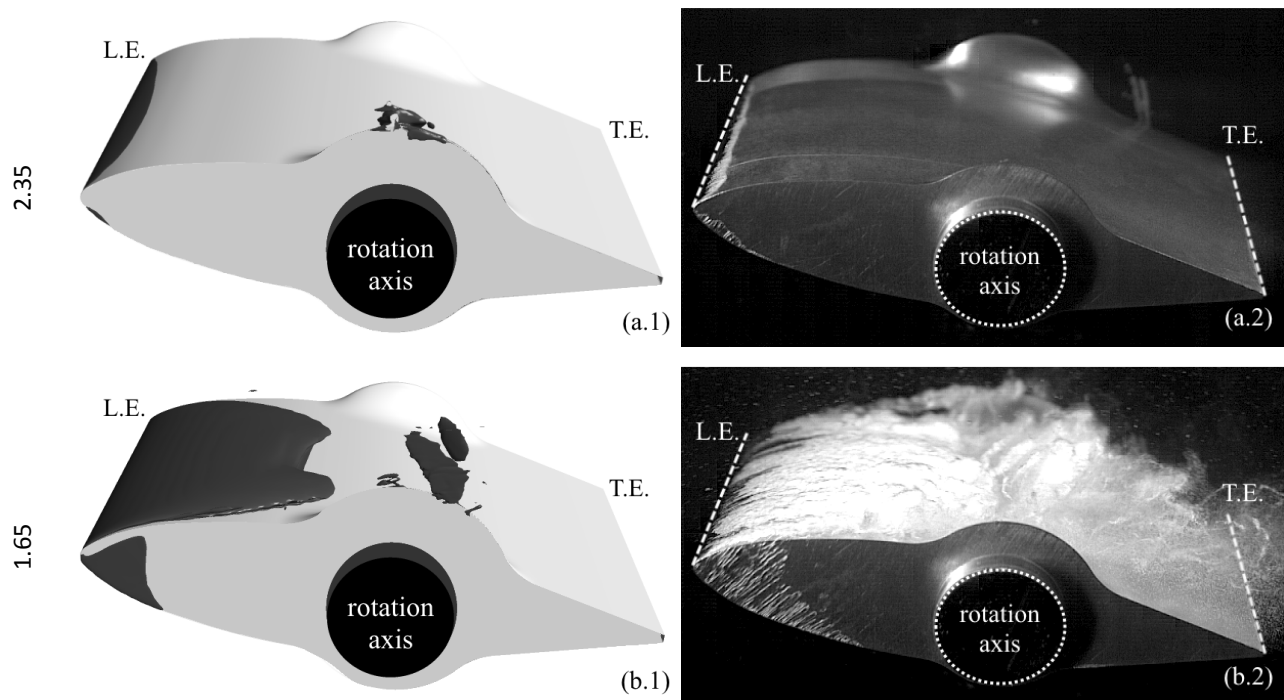


Рисунок 13. Сравнение мгновенных распределений паровой фазы в (1) расчете (визуализация изоповерхности объемной доли пара $f_v = 0.3$) и (2) эксперименте (фотографии кавитационных каверн) со стороны разрежения ПЛ2 и в переднем торцевом зазоре h_1 (см. Рис. 3) при $\alpha = 9^\circ$: (a) $\sigma = 2.35$ (пленочная каверна) и (b) $\sigma = 1.65$.

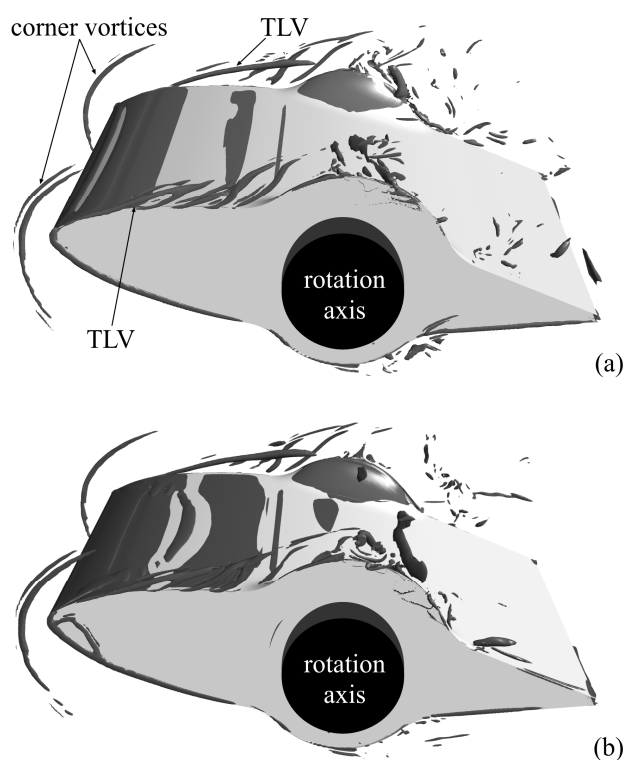


Рисунок 14. Мгновенное распределение вихревых структур (визуализация изоповерхностью Q -критерия) по результатам численного моделирования кавитационного обтекания ПЛ2 при $\alpha = 9^\circ$: (a) $\sigma = 2.35$ (пленочная каверна) и (b) $\sigma = 1.65$. TLV – концевой вихрь (tip-leakage vortex).

Аннотация

Проведено исследование кавитационного обтекания двух моделей поворотных лопаток гидротурбины с помощью методов вычислительной гидродинамики. Расчёты выполнены для двух углов атаки 3° и 9° и разных режимов течения. Численная модель протестирована на данных экспериментального исследования, в частности выполнено прямое сравнение измеренной скорости течения в пределах пограничного слоя с результатами расчетов. Расчёты показали, что для определенных условий течения возникают периодические пульсации длины паровой каверны и локального давления. Наличие тонких торцевых зазоров и осевых обтекателей у второй модели привело к появлению новых областей кавитации. Было показано, что щелевая кавитация существует в виде паровой пленки и ее размер в существенной степени зависит от фазы развития основной каверны со стороны разрежения лопатки на нестационарных режимах течения. В расчете было обнаружено образование нестационарных кавитирующих вихрей в углах между торцом лопатки и стенкой канала. Несколько расчётов выполнено на вычислительном комплексе Информационно-вычислительный центра Новосибирского государственного университета.