

Тема: «Моделирование энергетических процессов на современном уровне сложности: нестационарные явления в гидроэнергетическом оборудовании.»

Состав коллектива:

к.ф.-м.н., ведущий инженер ЛМЭП НИЧ НГУ, Гаврилов А.А.,

к.ф.-м.н., инженер ЛМЭП НИЧ НГУ, Сентябов А.В.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-29-00203 «Моделирование энергетических процессов на современном уровне сложности» под руководством проф. К. Ханъялича.

#### Научное содержание работы.

Во втором блоке работ по направлению «Нестационарные явления в гидроэнергетическом оборудовании» предполагается изучение особенностей гидродинамики течений вблизи кавитирующих двухмерных и трехмерных гидрокрыльев, представляющих собой канонические модели элементов реальных гидроагрегатов и водных транспортных объектов. Развитие численных моделей высокорейнольдсового турбулентного многофазного потока и их применение к исследованию течения в проточном тракте гидротурбин.

На сегодняшний день гидравлический расчёт гидротурбин проводится в основном на полуэмпирических моделях турбулентности, использующих гипотезу Буссинеска. Хотя указанные подходы, в целом позволяют рассчитать качественно интегральные параметры гидротурбин в различных режимах работы, простые модели турбулентной вязкости, как известно, неспособны воспроизвести трехмерные нестационарные явления, в особенности трехмерные отрывные течения с сильной кривизной линий тока, их неустойчивость и крупные вихревые структуры. Для более точного расчета таких течений необходимо использовать современные модели турбулентности второго порядка замыкания (модели переноса напряжений Рейнольдса) с адекватным учетом пристенных эффектов (современные пристеночные функции), или гибридный RANS/LES метод, в котором пристенная область разрешается с помощью хорошо протестированной RANS-модели, а LES используется вдали от стенок. Необходимость современного уровня моделирования особенно важна для расчета кавитационных течений, как для самого потока (вихревой кавитационный жгут), для которого важно аккуратное моделирование локального нестационарного поля давления, так и для кавитации на поверхностях (лопатки гидротурбин, гидропрофили и пропеллеры), где необходимо правильное моделирование сильно анизотропного пристенного распределения турбулентных напряжений. Помимо этого, модель должна быть взаимосвязана с адекватной моделью кавитации и моделью обратного влияния кавитации на турбулентность, включая индуцированные кавитацией пульсации потока и сглаживание низких частот турбулентных пульсаций. Подобные расчеты неизвестны в литературе и будут основной целью данного проекта, в котором планируется развить и протестировать всестороннюю модель процесса и получить результаты вычислений, дополняющие экспериментальные данные

Моделирование кавитирующего течения было основано на решении трехмерных уравнений Рейнольдса, описывающих турбулентное течение несжимаемой жидкости, с помощью метода контрольного объема в переменных скорость–давление. Для моделирования кавитации к уравнениям Рейнольдса добавляется уравнение переноса доли пара. Свойства двухфазной смеси зависят от локального значения объемной доли пара  $\alpha_v$ , в частности, ее плотность  $\rho$  определяется как плотность двухкомпонентной среды через плотности отдельных фаз. Численное исследование кавитационного обтекания элементов проточного тракта гидротурбин проводилось на основе экспериментальных исследований ИТ СО РАН кавитационном контуре. На данном стенде проводились исследования

обтекания гидрокрыла NACCA0015 при различных углах атаки ( $0 - 9^\circ$ ) и параметрах кавитации (от бескавитационного обтекания до облачной кавитации). Расчетная модель включала в себя рабочий участок контура, в центре которого располагалось исследуемое крыло. Расчетная сетка состояла из 3 млн. гексаэдральных ячеек с детализацией вблизи крыла. Параметры среды, абсолютное давление на выходе и расход были взяты из экспериментальных данных, а сравнение с экспериментом проводилось для поля скорости вблизи крыла и размеру паровой каверны над крылом. Рассматривались следующие модели турбулентного течения: двухпараметрическая модель вихревой вязкости ( $k-\omega$  SST), метод моделирования отсоединенных вихрей на основе модели  $k-\omega$  SST (DES) и модель переноса рейнольдсовых напряжений RSM. В бескавитационном режиме (угол атаки  $3^\circ$ ) модель  $k-\omega$  SST и RSM показывают хорошее количественное согласие с экспериментальными данными по средней скорости в пограничном слое и качественное – по пульсациям скорости (модель RSM). При пузырьковом обтекании (угол атаки  $3^\circ$ ) размеры области кавитации близки к экспериментальным данным для обеих стационарных моделей, но средняя скорость за ней заметно лучше воспроизводится с помощью модели RSM. Были проведены расчеты с использованием различных моделей кавитации, а также при варьировании таких кавитационных параметров как объемная доля зародышей кавитации и радиус пузырьков. Тем не менее, результаты моделирования не показали существенных отличий. В режиме облачной кавитации наблюдаются периодические колебания паровой каверны, а среднее течение за каверной точнее воспроизводится при использовании метода DES. Так, расчет методом DES для режима  $\sigma = 0,78$  демонстрирует периодическое изменение размеров каверны. В результате средний размер каверны получился несколько больше, чем в стационарном расчете с использованием модели  $k-\omega$  SST, и ближе к экспериментальным данным, а граница каверны в хвостовой части размывается. Распределение скорости вблизи передней кромки, полученное методом DES, близко и к стационарному расчету, и к эксперименту. Как результат DES-моделирования, получена нестационарная динамика паровой каверны и зарегистрирован сход вихрей за ней. Неустойчивость расчета для режима  $\sigma = 0,78$  не позволяет получить стационарное решение с помощью модели RSM, поэтому было проведено нестационарное моделирование. Несмотря на то, что течение в пограничном слое хорошо описывается с помощью модели RSM, она не позволяет разрешить образование вихрей позади паровой каверны и их дальнейший унос вниз по течению основным потоком. При большем угле атаки ( $9^\circ$ ) течение становится сильно нестационарным – происходит периодический сход вихрей с задней кромки крыла – и корректный расчет кавитационного обтекания возможен только с использованием нестационарных методов (типа DES). При этом начинают играть важную роль трёхмерные эффекты (отрыв потока от боковых стенок канала).

Для совместного моделирования течения в рабочем колесе и неподвижных частях гидротурбины в программном комплексе SigmaFlow была добавлена возможность выполнения сквозного расчета задач с вращающимися подобластями. На границе раздела подобластей используется условие непрерывности абсолютной скорости. Была также разработана гибридная модель RANS/LES на основе модели  $k-\varepsilon-\zeta-f$ . Выполнены тестовые расчеты турбулентного установившегося течения в плоском канале. Методы расчёта однофазного турбулентного течения и программный комплекс SigmaFlow были верифицированы на задачах расчета закрученного потока после внезапного расширения и расчета изотермического течения в вихревой горелке. Расчеты проводились с использованием нестационарной модели переноса рейнольдсовых напряжений и разработанной гибридной RANS/LES модели. На основе геометрических и режимных данных, предоставленных организаторами семинара Francis-99, было выполнено численное исследование нестационарного закрученного турбулентного течения в отсасывающей трубе радиально-осевой гидротурбины в режиме частичной нагрузки (при расходе 35% от расхода в оптимальном режиме). В данном режиме за рабочим колесом образуется обширная зона рециркуляции, а нисходящее закрученное течение прижато к стенкам

отсасывающей трубы. Для постановки граничных условий на входе была построена модель проточного тракта гидротурбины, причем ротор моделировался в приближении «замороженного колеса» и использовалась относительно грубая сетка. Основные расчеты течения в отсасывающей трубе были выполнены на детальной расчетной сетке, содержащей 5,6 млн. гексаэдральных ячеек. Рассматривались три модели для расчета турбулентного течения: модель  $k-\varepsilon-\zeta-f$  (Hanjalić et al, 2004), квадратичная модель переноса рейнольдсовых напряжений RSM (Speziale C. G., Sarkar S. and Gatski T.B., 1985) в нестационарном варианте и гибридная RANS/LES модель (HYB) на основе модели  $k-\varepsilon-\zeta-f$ . Указанные модели и их модернизации были реализованы в программном коде SigmaFlow. В отличие от модели  $k-\varepsilon-\zeta-f$ , использующей приближение вихревой вязкости, модель RSM и гибридная RANS/LES модель воспроизводят формирование крупных вихревых структур: прецессию вихревого ядра и спиральные вихри, формирующиеся в вихревом следе за лопастями рабочего колеса (Рис. 1). Обусловленный ими поперечный перенос импульса и момента импульса сказывается на поле средней скорости и, особенно, на пульсациях скорости. Хотя непосредственно за рабочим колесом уровень пульсаций несколько занижается всеми моделями (в силу близости входной границы), но уже на расстоянии около одного диаметра ротора пульсации компонент скорости, рассчитываемые моделями RSM и HYB, близки к экспериментальным данным. Прецессирующее вихревое ядро и спиральные вихри вокруг него генерируют пульсации давления на характерных частотах  $f/f_0 \sim 0.27$  и  $f/f_0 \sim 2$ , где  $f_0$  – частота вращения рабочего колеса. Такие же частоты наблюдаются и на экспериментальном спектре пульсаций давления. Сопоставление разрешаемых и моделируемых пульсаций показывает, что для модели RSM обе составляющие имеют одинаковый порядок даже в области сдвигового слоя. Как модель RSM, так и гибридная модель показывают сложную вихревую структуру, в то время как модель  $k-\varepsilon-\zeta-f$  приводит к стационарному решению. Основные пульсации и вихревые структуры получаются похожими и для метода RSM, и для гибридного URANS/LES метода. В то же время гибридный метод разрешает большое количество мелких вихрей и, соответственно, большой диапазон спектра энергии турбулентных пульсаций.

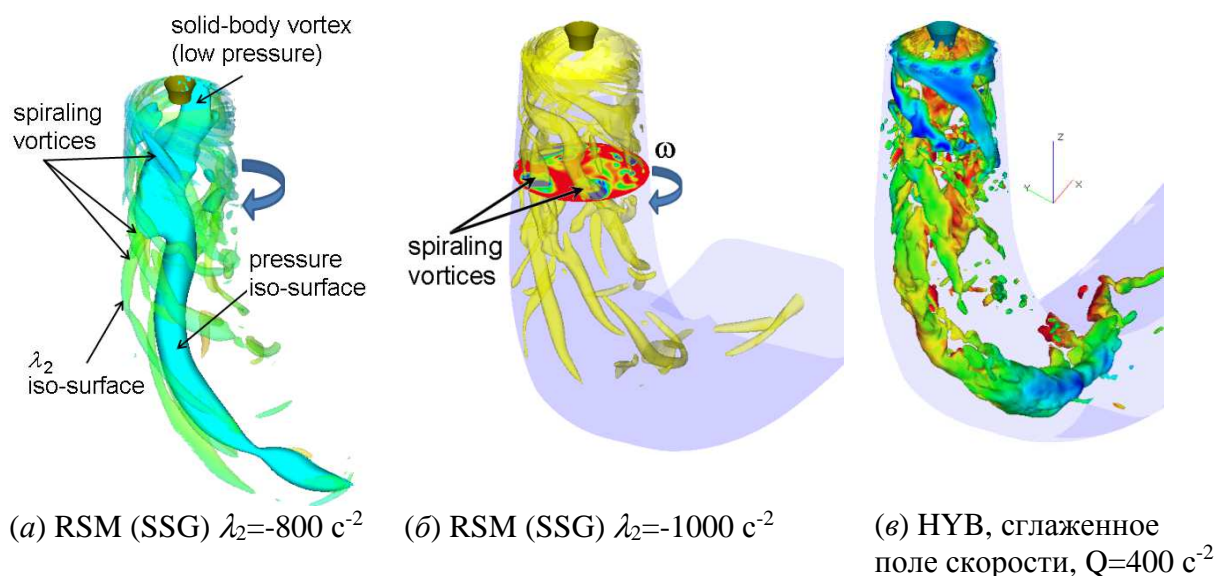


Рисунок 1. Система крупных спиральных вихрей: (а, б) – система спиральных вихрей охватывает прецессирующее вихревое ядро (RSM, показано изоповерхностью  $\lambda_2$ ); (в) – мгновенные вихревые структуры в сглаженном поле скорости (гибридная модель, изображено с помощью изоповерхности  $Q$ -критерия, цветом показана аксиальная компонента скорости).

С помощью кластера НГУ проводились расчеты течения вихререзающими моделями турбулентности, требующие значительных вычислительных ресурсов.

Публикации:

1. Minakov A.V., Sentyabov A.V., Platonov D.V., Dekterev A.A., Gavrilov A.A. Numerical modeling of flow in the Francis-99 turbine with Reynolds stress model and detached eddy simulation method // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 579. doi:10.1088/1742-6596/579/1/012004
2. Minakov A.V., Platonov D.V., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Zakharov A.V., The numerical simulation of low frequency pressure pulsations in the high-head Francis turbine // *Computers and Fluids*, Vol. 111, April 2015, pp. 197 – 205. doi:10.1016/j.compfluid.2015.01.007
3. Minakov A.V., Platonov D.V., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Zakharov A.V., The analysis of unsteady flow structure and low frequency pressure pulsations in the high-head Francis turbines // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, Vol. 53, pp. 183 – 194  
DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.04.001
4. Гаврилов А.А., Дектерёв А.А., Сентябов А.В., Моделирование закрученных течений с когерентными структурами с помощью нестационарной модели переноса рейнольдсовых напряжений / *Механика жидкости и газа*, №4, 2015, с. 11 – 24.
5. A.A. Gavrilov, A. V. Sentyabov, A.A. Dekterev and K. Hanjalić. Vortical structures and pressure pulsations in draft tube of a Francis-99 turbine at part load: RANS and hybrid RANS/LES analysis // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016 (June) doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.05.007 (Available online 28 June 2016)
6. Сентябов А.В., Тимошевский М.В., Первунин К.С., Гаврилов А.А., Маркович Д.М., Дектерёв А.А. (2016) Расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания гидрокрыла НАСА0015 // *Известия Томского политехнического университета: Инжиниринг георесурсов*, Т. 327, № 8, стр. 28-43