

# Использование высокопроизводительных вычислений для расчета нестационарного турбулентного течения в отсасывающей трубе гидротурбины

А.В. Сентябов

В работе рассмотрено численное моделирование прецессии вихря в отсасывающей трубе гидротурбины Turbine-99 с помощью метода моделирования отсоединенных вихрей (DES). Для проведения расчетов на многопроцессорных вычислительных системах задача распараллеливалась с использованием декомпозиции расчетной области. В результате моделирования получены параметры прецессии вихря в отсасывающей трубе, определены характерные частоты и величины пульсаций.

## 1. Введение

Развитие вычислительной техники позволило активно использовать средства вычислительной гидродинамики для решения инженерных задач. В настоящее время широко распространены расчеты турбулентных течений в трехмерных областях на основе решения стационарных усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations – RANS). Решение подобных задач не требует значительных вычислительных ресурсов и может быть выполнено в однопроцессорных расчетах. Высокопроизводительные многопроцессорные системы, как правило, использовались для решения ограниченного круга исследовательских задач, получения прецизионной информации с помощью прямого численного моделирования (DNS) канонических турбулентных течений и метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). Такие методы, как LES, основанные на решении нестационарных уравнений Навье-Стокса, позволяют получить более точную и подробную информацию о течении, чем RANS.

Метод LES и, особенно, гибридные RANS/LES методы начинают активно применяться в инженерной практике. С одной стороны, это позволяет повысить точность расчета турбулентных задач, которые плохо описываются RANS-моделями, как, например, закрученные потоки. С другой стороны, нестационарные расчеты позволяют исследовать эффекты, вызываемые крупномасштабными вихревыми структурами.

Примером таких эффектов может служить прецессия вихревого ядра в отсасывающей трубе гидроэлектростанции. Отсасывающая труба представляет собой часть проточного тракта гидравлической электростанции, соединяющую гидротурбину с нижним бьефом. Поток, входящий в отсасывающую трубу после прохождения гидротурбины, обладает той или иной степенью закрутки в зависимости от режима работы турбины. При некоторых режимах в течении могут возникнуть крупномасштабные пульсации вследствие прецессии вихря. Такие пульсации давления приводят к вибрации и повышенному износу конструкций. По этой причине достаточно большое внимание уделяется экспериментальному и численному исследованию нестационарных явлений в отсасывающей трубе гидротурбины, определению частоты и величины пульсаций, способам управления частотой прецессии вихря.

Разрешение эволюции крупномасштабных вихрей в нестационарных расчетах требует использования детальных расчетных сеток и небольших временных шагов. Соответственно для проведения таких расчетов возникает потребность в высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных системах и параллельном программном коде.

В данной работе проводится численное исследование течения в отсасывающей трубе гидротурбины Turbine-99 (Holleforsen) с помощью программного комплекса  $\sigma$ Flow с использованием гибридных подходов. Расчеты проводились на узлах вычислительного кластера Сибирского Федерального Университета с помощью распараллеливания задачи на основе декомпозиции расчетной области.

## 2. Постановка задачи

Моделирование проводилось для отсасывающей трубы турбины Turbine-99 [1], изображенной на рис. 1. Радиус входа этой отсасывающей трубы составляет 236,5 мм, расход – 522 кг/с, частота вращения рабочего колеса – 595 об./мин.

При проведении нестационарных расчетов профили компонент скорости на входе брались из работы [2] и соответствующий им расход составлял 482 кг/с, который использовался для постановки граничных условий в расчете. Граничные условия на входе представляли собой двумерное (зависящее от угла и радиуса) поле скорости, которое вращается вместе с лопастями с частотой 595 об./мин. (62,3 рад/с). Двумерное поле скорости на входе периодически по углу с пятью периодами на один оборот, что соответствует пяти лопастям рабочего колеса. Параметр закрутки на входе, определяемый как отношение потока момента импульса к потоку импульса и радиусу входа, составлял 0,27. Уровень турбулентных пульсаций на входе согласно эксперименту составляет примерно 14%. На выходе задавались условия сноса.

## 3. Модель

Течение описывается уравнениями Рейнольдса. Вихревое течение в диффузорном канале зачастую сопровождается крупномасштабными пульсациями, вызванными прецессией вихря. По этой причине RANS-модели будут плохо описывать течение. Такого недостатка лишен метод моделирования крупных вихрей (LES), однако его применение требует очень детальной сетки, особенно вблизи стенок. В то же время RANS-модели достаточно экономичны и хорошо описывают пограничные слои. Чтобы соединить достоинства этих подходов в работе [3] был предложен метод моделирования крупных вихрей (DES).

Метод DES (Detached Eddy Simulation – моделирование отсоединенных вихрей) сочетает подходы RANS и LES. В областях потока, где размер вычислительной сетки  $\Delta$  достаточен для разрешения больших вихрей т.е. при  $\Delta < l_t$  применяется LES, а в остальной области – уравнения Рейнольдса. Таким образом, в пограничных слоях работают RANS-модели, а, например, в областях отрыва – LES. Метод DES был обобщен на другие модели турбулентности и появились различные его модификации. В данной работе метод DES основывался на  $k-\omega$  SST модели Ментера и ограничении турбулентной вязкости.

Решение уравнений несжимаемой жидкости производилось с помощью процедуры SIMPLEC. Дискретизация уравнений переноса осуществлялась по методу контрольных объемов на блочно-структурированной сетке из гексаэдральных ячеек. Использовались три многоблочные гексаэдральные сетки 29 тыс. ячеек (рис. 1), 232 тыс. ячеек и 783 тыс. ячеек.

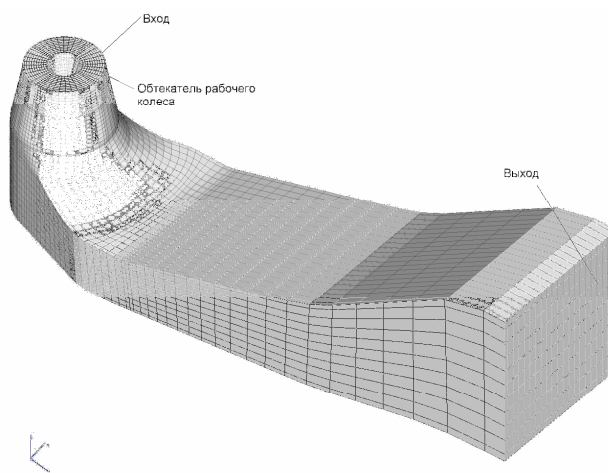


Рис.1. Расчетная сетка, 29 тыс. ячеек

Использование гибридных методов моделирования турбулентных течений требует существенных вычислительных ресурсов. Для решения этой проблемы была разработана параллельная

реализация вычислений в программном комплексе  $\sigma$ Flow путем декомпозиции расчетной области. Параллельные расчеты проводились на вычислительном кластере Сибирского Федерального Университета.

#### 4. Результаты моделирования

Для рассматриваемого случая в работе [4] были проведены измерения давления в различных точках на стенке конуса отсасывающей трубы в зависимости от времени. По результатам этих измерений были получены спектры пульсаций. В самом начале спектра наблюдается низкочастотный участок, соответствующий крупномасштабным нестационарным эффектам – прецессии вихря. Пульсации, связанные с вращением колеса, быстро убывают вниз по течению и в нижней точке становятся сравнимы с низкочастотными. Частоты крупномасштабных пульсаций лежат в интервале 1 – 2 Гц с максимумом в точке 1,64 Гц.

Нестационарные расчеты проводились с шагом 0,001 с, что соответствует числу Куранта  $C_{CFL} < 0.4$  во всей области течения для сетки 29 тыс. ячеек и  $C_{CFL} < 1$  для сетки 232 тыс. ячеек. При расчетах на детальных сетках изменение спектров пульсаций давления и кинетической энергии турбулентности длилось около 30 с. Мониторинг проводился в точке с координатами (0,19; 0,19; -0,14) в конце конуса в объеме. Период низкочастотных колебаний составил около 0,5 с ( $f \approx 2$  Гц). Фурье-преобразования сделаны по 32768 временным точкам, занимающим интервал около 33 с. За это время прецессирующий вихрь совершил около 50 оборотов.

Вблизи входа преобладают высокочастотные пульсации, кратные  $f_b = 49.6$  Гц, индуцированные вращением колеса. В конце конического диффузора наибольшей интенсивностью обладают низкочастотные пульсации  $f = 1,5 \div 2$  Гц.

Рассмотрение спектров низкочастотных пульсаций в зависимости от детализации сетки (рис. 2) показывает, что с увеличением детализации выделяется единственная определенная частота около 1,7 Гц. При этом высота пика увеличивается, а его толщина – уменьшается. Максимум спектра немного смещается относительно результатов на грубой. Частоты, полученные по методу DES с использованием схем Quick и Umist TVD, на более детальной сетке (232 тыс. ячеек) почти не отличаются (1,74 Гц и 1,70 Гц соответственно), в отличие от результатов на грубой сетке. Величина пульсаций давления растет с детализацией сетки, но на двух самых детальных сетках почти не отличается.

Частота прецессии и величина пульсаций давления в зависимости от расчетной сетки сведены в таблицу 2. Для двух самых детальных сеток (232 тыс. и 783 тыс. ячеек) ни частота прецессии, ни величина пульсаций давления уже не отличаются. Число Струхали определялось как

$$Sh = \frac{f \cdot d}{U_{in}}, \text{ где } d = 0,473 \text{ – наибольший диаметр входа, } U_{in} \text{ – средняя скорость на входе. Для}$$

сравнения приведены результаты расчетов других авторов. Результаты в данной работе близки к результатам других авторов и экспериментальным данным.

Таблица 2. – Результаты нестационарных расчетов в зависимости от расчетной сетки

	Частота, Гц	Число Струхали	$\Delta p$ , Па	$\Delta p/(\rho v^2/2)$
DES 29 000, $\sigma$ Flow	1.5	0.21	2000	0.34
DES 232 000, $\sigma$ Flow	1.7	0.23	3000	0.52
DES 783 000, $\sigma$ Flow	1,7	0,23	3000	0,52
LES, Kurosava [5]	1.5	0.21	3000	0.54
DES, Marjavaara [6]	1.7	0,22	2600	0.40
URANS, Page [7]	2.08	0,27	-	-
DES, Nilsson [8]	2.08	0,27	-	-
Эксперимент [4]	1.6	0.21	-	-

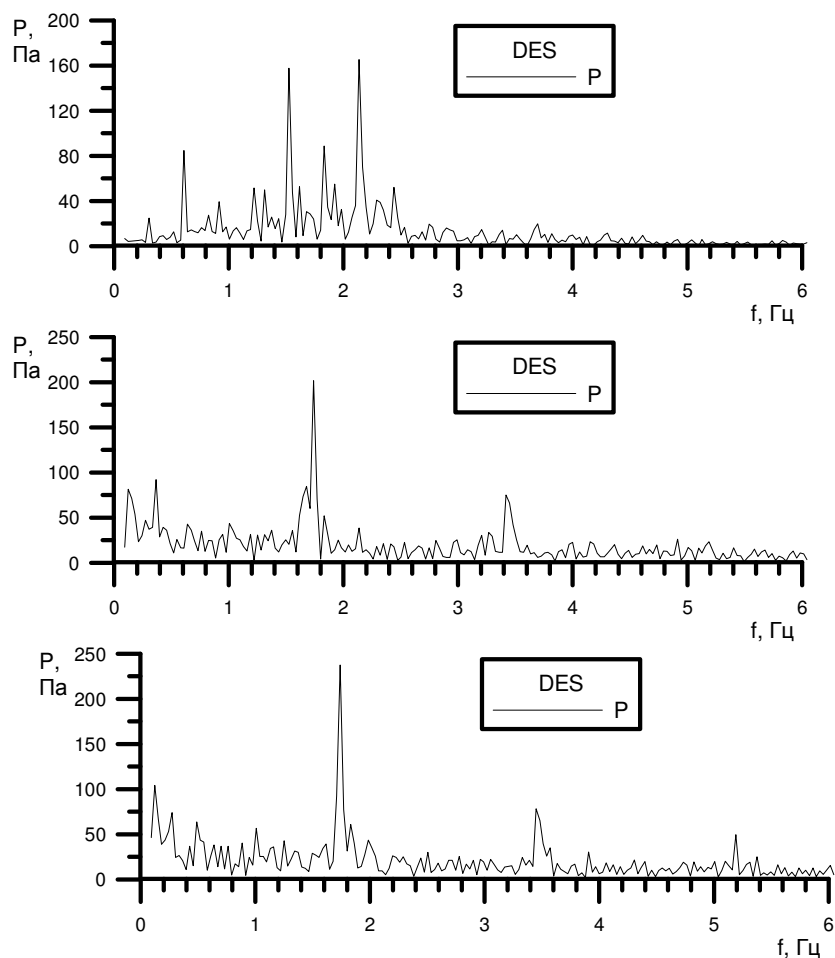


Рис. 2. Спектры пульсаций давления в точке мониторинга №1, полученные с помощью подхода DES на сетках 29 тыс. , 232 тыс. и 783 тыс. ячеек сверху вниз соответственно

Визуально прецессию вихря можно изобразить с помощью изоповерхности  $\lambda_2$ , показывающей области минимума давления, связанные с закруткой потока. На рис. 3 приведены положения прецессирующего вихря с интервалом в  $\frac{1}{4}$  оборота, рассчитанное в программе  $\sigma$ Flow. Можно увидеть, что вращение вихревого ядра происходит по часовой стрелке – так же, как в расчетах [5]. Отметим, что частота, определенная по данной визуализации, составляет около 1,8 Гц, что соответствует разложению Фурье спектров пульсаций.

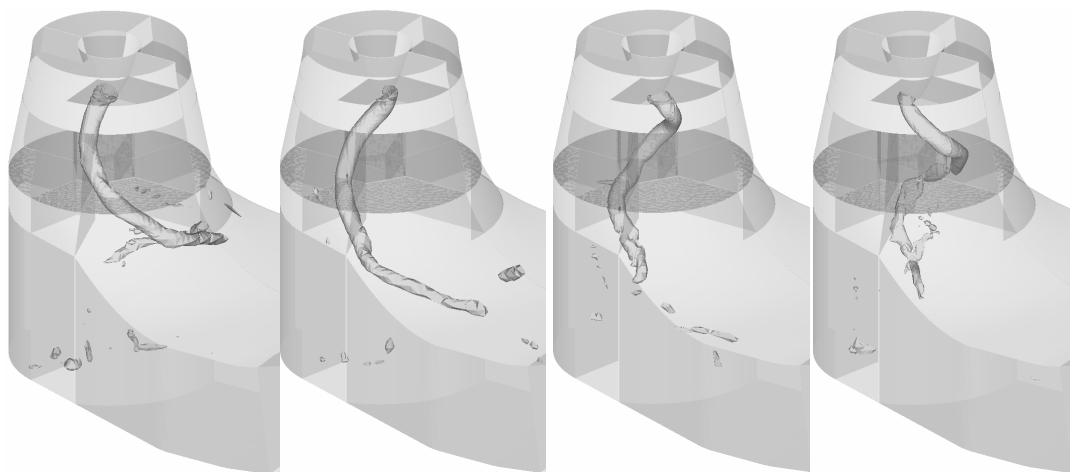


Рис. 3. Прецессия вихря (около одного оборота, через четверть периода, 0.14 с), изоповерхность  $\lambda_2$ , DES, кадры слева направо

## 5. Заключение

В результате данной работы было проведено численное моделирование прецессии вихря в отсасывающей трубе гидротурбины, определены частоты и величины вызванных ею пульсаций. Решение такого рода задач стало возможным благодаря развитию в программном коде  $\sigma$ Flow, разрабатываемого специалистами Института Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и кафедры Теплофизики Сибирского Федерального Университета (СФУ), гибридных методов моделирования турбулентных течений (DES), параллельного проведения расчетов, работы под управлением системы Unix. Для проведения расчетов была организована работа по проведению расчетов в программе  $\sigma$ Flow на вычислительном кластере СФУ. Таким образом, использование высокопроизводительных вычислительных систем существенно расширяет круг задач, доступных для решения в инженерных приложениях.

## Литература

1. Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC workshop on draft tube flows Turbine 99.
2. Andersson, U., Turbine 99 – Experiments on draft tube flow (test case T). In proceedings from Turbine 99 – Workshop on draft tube flow, 2000, ISSN: 1402 – 1536.
3. Spalart, P.R., Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid, RANS/LES approach, – P.R. Spalart, W.-H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras, – In Lue, C. and Lue, Z., (eds) Advances in DNS/LES, Proceedings of 1<sup>st</sup> AFOSR International Conference on DNS/LES, Ruston, LA, August, 4-8, Greyden Press, Columbus, OH, 1997, pp. 137-147.
4. Lovgren, H.M., Time-Dependent Pressure Measurements on the Turbine-99 Draft Tube, – H. M. Lovgren, M.J. Cervantes, L. H. Gustavsson, – 2<sup>nd</sup> IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitations and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, October 24 – 26, 2007.
5. Kurosava, S., Unsteady turbulent flow simulation in T99 draft tube, – S. Kurosava, K. Nakamura, – Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC workshop on draft tube flows Turbine 99, pp. 73 – 82, 2005.
6. Marjaavara, B. D., Steady and unsteady CFD simulation of the Turbine-99 draft tube using CFX-5 and Stream, – D.B. Marjavaara, R. Kamakoti, T.S. Lundstrom, S. Thakur, J. Wright, W. Shyy – Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC workshop on draft tube flows Turbine 99, pp. 83 – 99, 2005.
7. Page, M., Steady and unsteady computation of Turbine-99 draft tube, – M. Page, A.M. Giroux, J. Nicolle, – Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC workshop on draft tube flows Turbine 99, pp. 109 – 124, 2005.
8. Nilsson, H., Experiences with OpenFOAM for water turbine application, – H. Nilsson, W. Gyllenram, – Proceedings of the 1st OpenFOAM International Conference, 26-27 November 2007.