

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.

Научное содержание работы.

Гидроэнергетика является одним из основных типов возобновляемой энергетики. При разработке и исследовании гидротурбин возникает множество научных и инженерных проблем, одним из эффективных методов решения которых является численное моделирование. 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.

Для проведения расчетных исследований использовались экспериментальные данные для различных режимов работы турбины, взятые из второго семинара Francis-99. 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. Расчетная область включала в себя направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу (Рис. 1). Расчетная сетка состояла из 4,3 млн. гексаэдральных и полиэдральных ячеек. 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 $k-\omega$ SST, $\zeta-f$, RSM. На основе геометрических и режимных данных, предоставленных организаторами семинара Francis-99 (<https://www.ntnu.edu/nvks/francis-99>), было выполнено численное исследование нестационарного закрученного турбулентного течения в отсасывающей трубе радиально-осевой гидротурбины в различных режимах.

В оптимальном режиме поток под рабочим колесом стационарный и слабо закрученный (Рис. 2б, 3б). Под обтекателем рабочего колеса присутствует небольшая область рециркуляции, которая формирует длинную область следа вдоль оси турбины. Изоповерхность давления показывает слабый прямой вихрь на оси турбины. Графики скорости (Рис.4) имеют минимум в области следа. Расчетные профили скорости хорошо совпадают с экспериментальными данными, а между моделями $k-\omega$ SST и $\zeta-f$ нет существенной разницы.

В режиме частичной нагрузки под рабочим колесом формируется крупномасштабный прецессирующий вихрь (Рис. 3а). Расчетный профиль аксиальной компоненты скорости показывает обширную область рециркуляции вблизи оси.

В режиме повышенной нагрузки присутствует слабый, но нестационарный вихрь под обтекателем рабочего колеса. вихрь подвергается неустойчивости и имеет спиральную форму. Расчетные профили скорости согласуются с экспериментальными, однако показывают существенную численную вязкость для всех моделей.

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

Публикации:

1. Gavrilov A., Dekterev A., Minakov A., Platonov D. and Sentyabov A. Steady state operation simulation of the Francis-99 turbine by means of advanced turbulence models // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 782 (2017) 012006. doi:10.1088/1742-6596/782/1/012006
2. Minakov A., Sentyabov A. and Platonov D. Numerical investigation of flow structure and pressure pulsation in the Francis-99 turbine during startup // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 782 (2017) 012004. doi:10.1088/1742-6596/782/1/012004
3. Platonov D., Minakov A., Sentyabov A. and Gavrilov A. Francis-99 turbine numerical flow simulation of steady state operation using RANS and RANS/LES turbulence model // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 782 (2017) 012005. doi:10.1088/1742-6596/782/1/012005
4. A. Sentyabov, A. Gavrilov, M. Krivov, A. Dekterev, M. Pritula, Development of a high-performance code for hydrodynamic calculations using graphics processor units // In: Sokolinsky L., Zymbler M. (eds) Parallel Computational Technologies. PCT 2017. Communications in Computer and Information Science, vol 753. pp. 288-300. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-67035-5_21

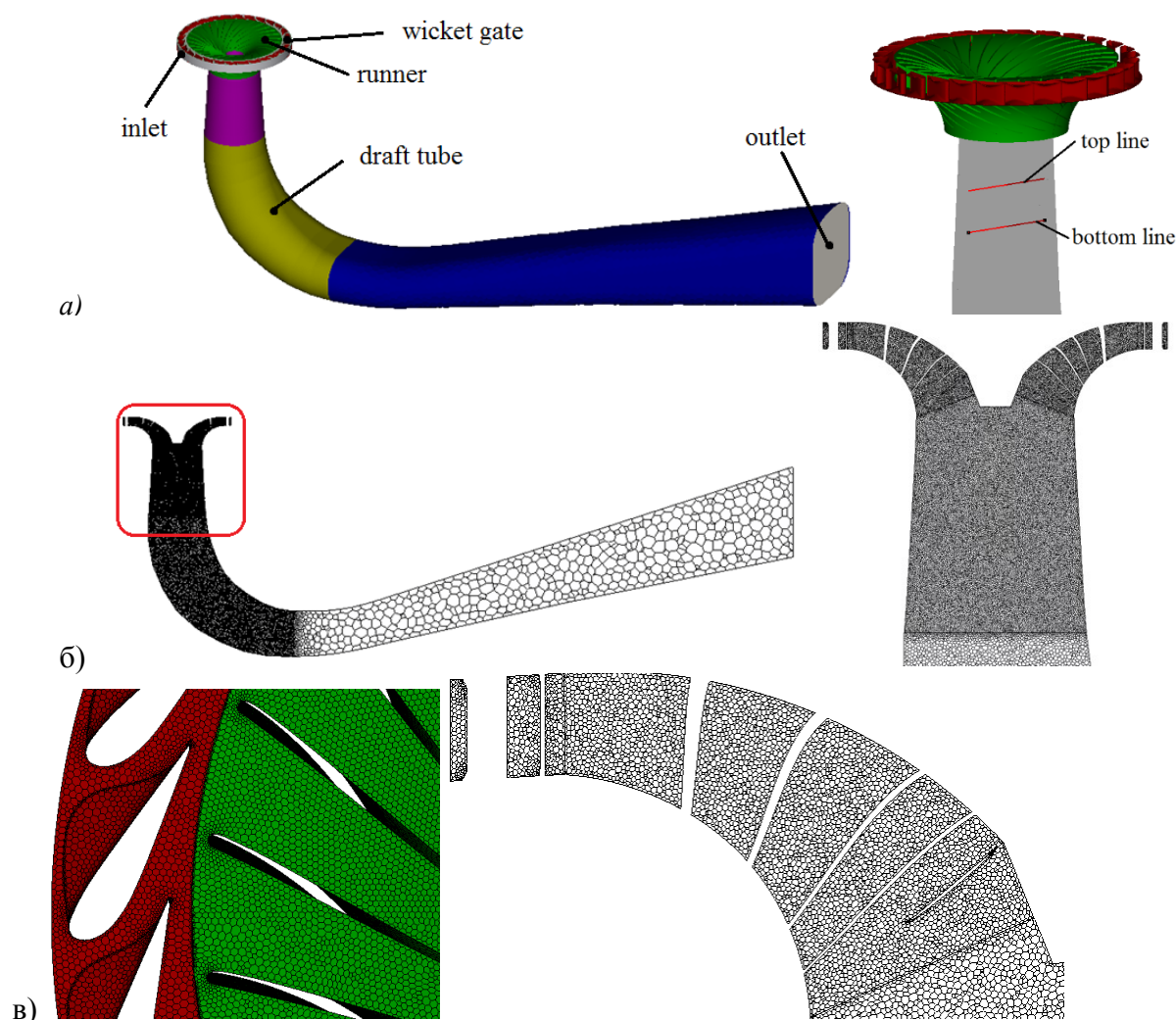


Рис. 1. Гидротурбина Francis-99; а) расчетная область; б) сетка в центральном сечении, в) сетка в направляющем аппарате и рабочем колесе

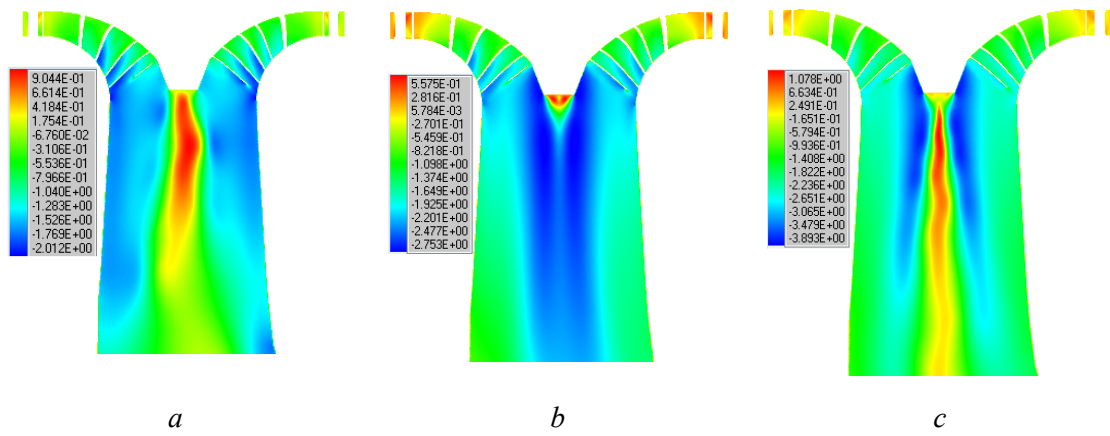


Рис. 2. Мгновенное поле скорости в центральном сечении (ζ - f модель): *a*) режим частичной нагрузки, *b*) оптимальный режим, *c*) режим повышенной нагрузки

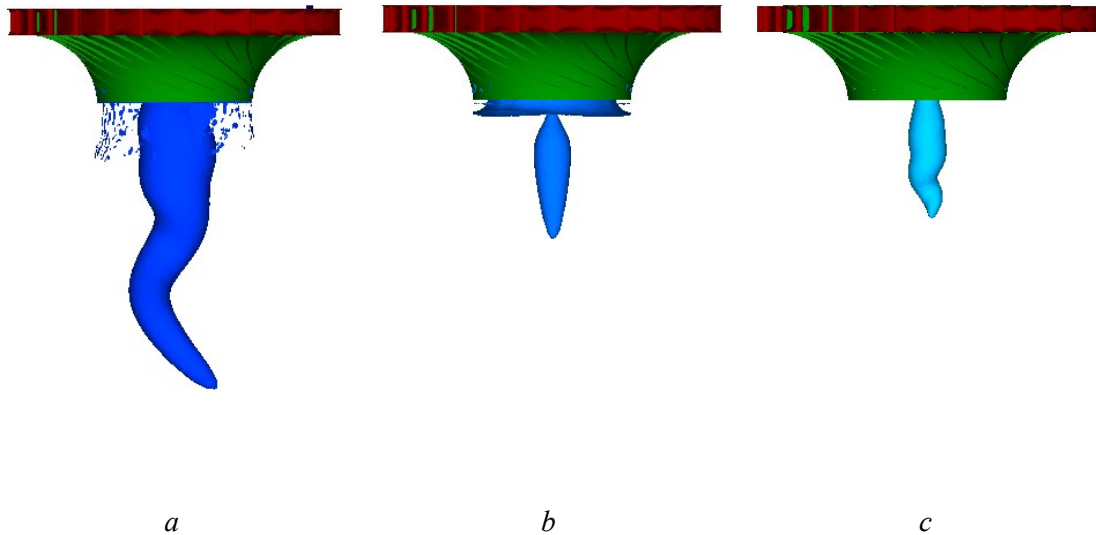


Рис. 3. Вихрь под рабочим колесом, визуализированный с помощью изоповерхности давления (ζ - f model): *a*) режим частичной нагрузки, *b*) оптимальный режим, *c*) режим повышенной нагрузки.

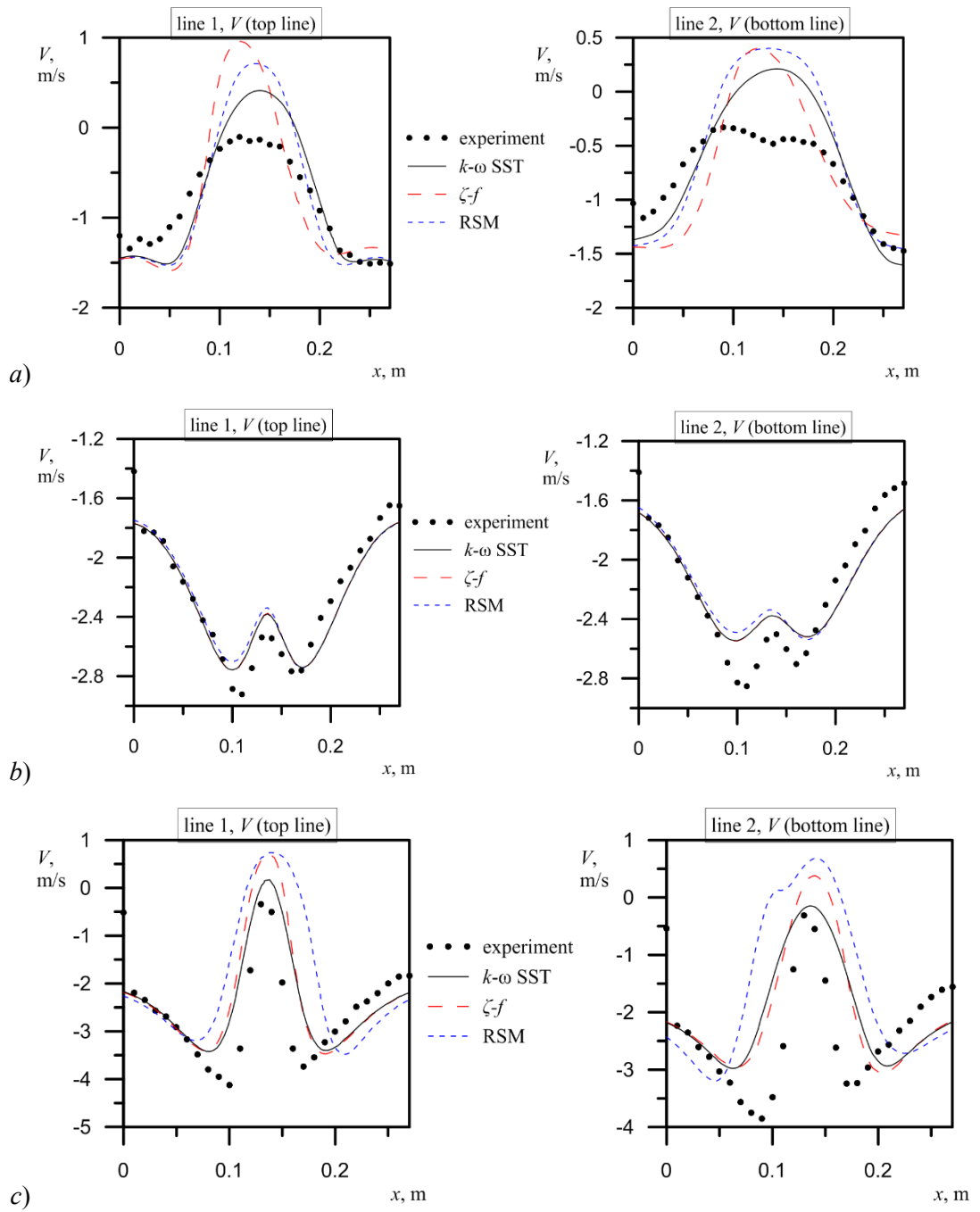


Рис. 4. Средняя аксиальная компонента скорости в отсасывающей трубе *a)* режим частичной нагрузки, *b)* оптимальный режим, *c)* режим повышенной нагрузки