

УДК 621.671.001.024

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСЧЕТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОСЕВОГО НАСОСА С БЫСТРОХОДНОСТЬЮ $n_s=570$

© 2013 Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступила в редакцию 18.03.2013

Исследовано влияние моделей турбулентности на расчетные характеристики осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ об/мин. Даны рекомендации по выбору некоторых расчетных параметров, влияющих на сходимость решения.

Ключевые слова: осевой насос, модель, турбулентность, расчетная сетка, сходимость решения

В программных продуктах расчета течения вязкой жидкости реализованы разные математические модели, позволяющие моделировать течение несжимаемое и сжимаемое, с теплообменом, с кавитацией, с различными реакциями и т.д. Одним из важнейших параметров, который учитывается при постановке задачи и выборе граничных условий, является модель турбулентности. При расчетном исследовании турбомашин с использованием программного комплекса Ansys CFX 12 возможно задание следующих моделей турбулентности: $k-\varepsilon$ модель, $k-\omega$ модель, BSL модель, SST модель, модель напряжений Рейнольдса. В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований влияния выбора модели турбулентности на интегральные параметры осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ об/мин. Проведено сравнение двух моделей турбулентности. Модель $k-\varepsilon$ использует для замыкания системы уравнений движения жидкости Рейнольдса дополнительно два дифференциальных уравнения, описывающих перенос кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Более новая модель турбулентности – SST модель переноса сдвиговых напряжений.

Исследование проводилось на базе осевого насоса ЦН-44 с быстроходностью $n_s=570$. Расчетная область течения включала один межлопастной канал направляющего аппарата (НА), рабочего колеса (РК) и выправляющего аппарата (ВА) насоса (рис. 1). Для построения расчетной сетки для расчета течения вязкой жидкости была использована программа ICEM CFD.

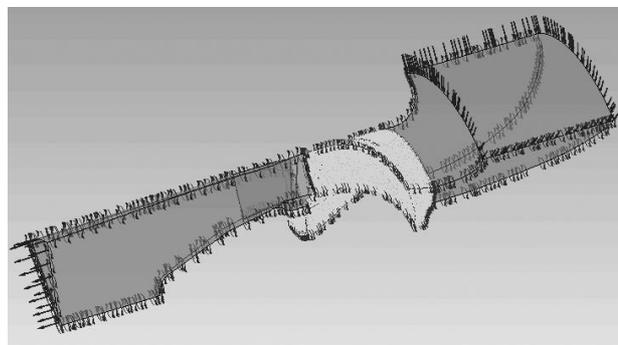


Рис. 1. Расчетная область проточной части осевого насоса

При использовании $k-\varepsilon$ модели турбулентности на результаты расчета сильно влияет расстояние, на которое удалены от твердой стенки ближайшие к ней узлы расчетной сетки. Первые узлы расчетной сетки должны попадать на границу вязкого подслоя, поэтому при подготовке расчетной сетки в программе ICEM CFD проводилось сгущение элементов вблизи входных и выходных кромок РК, поверхности лопаток и поверхности интерфейса путем создания слоев призматических ячеек. В программе расчета течения Ansys CFX 12 для безусловного выполнения этого условия и страховки пользователя от ошибки реализованы масштабируемые функции стенки, благодаря которым программа сама определяет в каких узлах сетки нужно переключиться на пристеночные функции. Это позволяет достигать более равномерной точности расчета в местах быстрого изменения параметров течения.

В модели турбулентности $k-\omega$ дифференциальное уравнение скорости диссипации ε заменено на дифференциальное уравнение частоты турбулентных пульсаций ω . Данная модель хорошо показала себя при расчетах вблизи стенок. Однако она также не лишена недостатков,

Свобода Дмитрий Геннадьевич, ассистент кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели». E-mail: svoboda.dmitry@gmail.com

Жарковский Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели». E-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru

главным из которых является зависимость результатов расчетов от задаваемых во входном сечении значений ω .

SST (Shear Stress Transport) модель переноса сдвиговых напряжений является гибридным вариантом между $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделями турбулентности. За счет использования специальной переключаемой функции, активируется та или иная модель турбулентности. Переключение осуществляется в зависимости от удаления узлов сетки от стенки. Таким образом, SST-модель сочетает в себе устойчивость и точность стандартной $k-\omega$ модели в пристеночных областях и $k-\epsilon$ модели на удалении от стенок. На рис. 2 и 3 показаны графики интегральных параметров, полученные в результате проведенных расчетов проточной части осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ для разных моделей турбулентности.

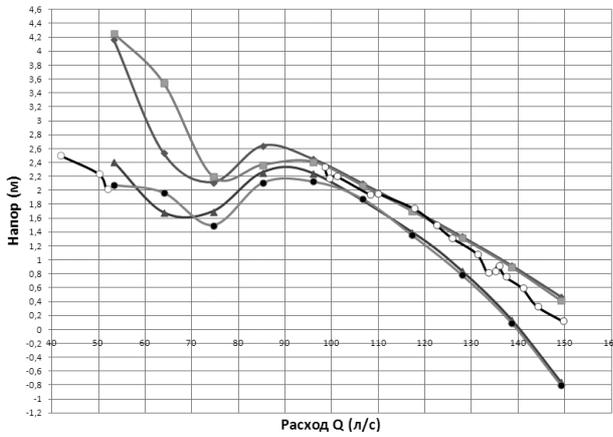


Рис. 2. Напорные характеристики насоса ЦН-44: -◆- РК (модель $k-\epsilon$), -■- РК (модель SST) -▲- ступень (модель $k-\epsilon$), -●- ступень (модель SST) -○- ступень (эксперимент)

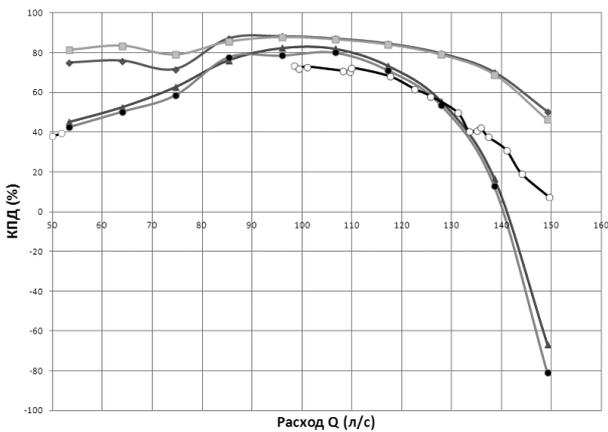


Рис. 3. Зависимость КПД насоса ЦН-44 от расхода (обозначения см. на рис. 2)

Из анализа полученных графиков следует, что при оптимальном и больших расходах модель турбулентности практически не влияет на значения напора и КПД насоса, поэтому для

более экономичных расчетов рациональнее использовать $k-\epsilon$ модель турбулентности. При малых расходах (0,5-0,7) $Q_{\text{опт}}$ появляется расхождение расчетных значений напора и КПД рабочего колеса и ступени насоса при расчете вязкой жидкости с использованием различных моделей.

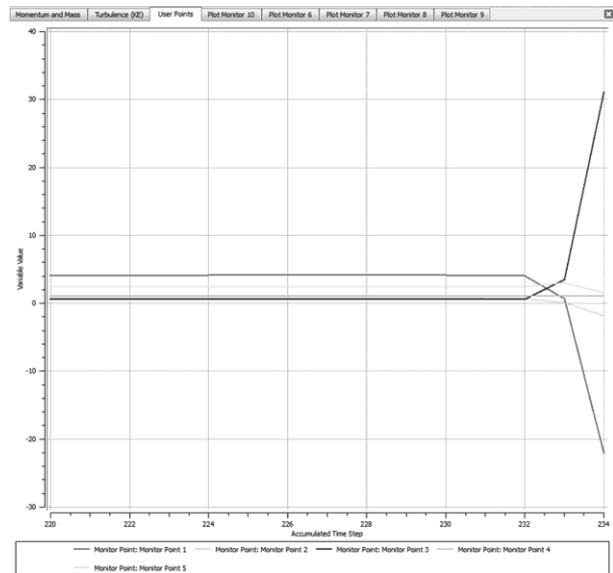
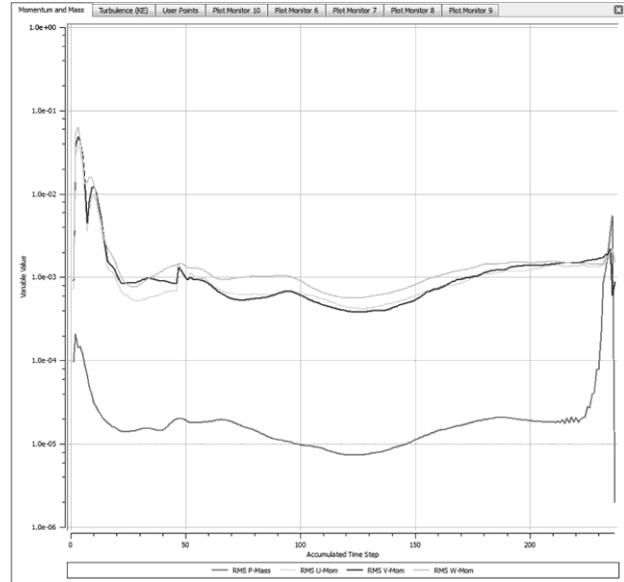


Рис. 4. Невязки интегральных параметров при срыве расчета

При проведении расчетов проточной части насоса с использованием программы Ansys CFX 12 также было проведено исследование влияние задаваемых в препроцессоре параметров на сходимость результата (низкий уровень значений невязок). На сходимость решения оказывает влияние целый ряд параметров: режим потока (установившийся или нестационарный), модель турбулентности, пристеночные функции, качество расчетной сетки, граничные условия. Решение считается сошедшимся при значении среднеквадратичных невязок (RMS) ниже $10^{-4}-10^{-5}$.

При этом графики расчетных интегральных величин (напора и КПД РК и насоса, потеря в НА и ВА) в зависимости от числа итераций выходят на горизонтальную линию или изменяются очень незначительно. Если же имеют место значительные колебания этих величин (в пределах 10-15%), то это означает либо появление отрывных вихрей, либо неустойчивость решения из-за некорректного задания граничных условий. Иногда при расчетах сходимость решения в стационарной постановке вообще не достигается из-за самой нестационарной природы течения жидкости в проточной части насоса. В таких случаях для получения результата, необходимо менять режим течения на нестационарный (тип анализа Transient). Также при расчете могут быть случаи, когда при достижении определенной итерации происходит срыв расчета. Тогда на некотором шаге глобальной итерации значения невязок резко возрастают, интегральные параметры насоса также сильно изменяются, расчет останавливается (рис. 4).

В таких случаях в первую очередь необходимо обратить внимание на качество расчетной сетки. Так как проточная часть лопастного насоса имеет достаточно сложную геометрию, то при построении в программе ICEM CFD применяют неструктурированную сетку. Тогда узлы сетки выбираются в пространстве расчетной области случайным образом. Это может привести к появлению вытянутых или искаженных ячеек. Также из-за некорректного задания параметров призматических слоев возможен резкий переход между толщинами последнего призматического слоя и тетраэдра (рис. 5). Всё это приводит к смещению центра контрольного объема ячейки сетки, что ведет к большой погрешности вычислений для этих участков.

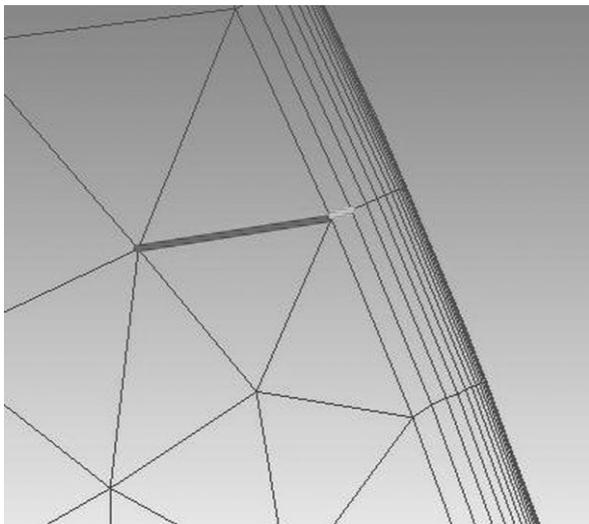


Рис. 5. Граница призматического слоя и тетраэдра

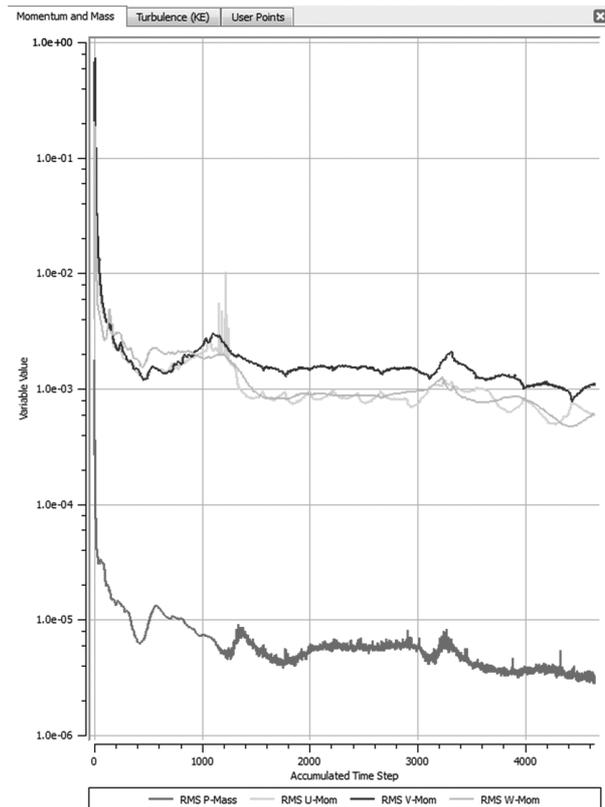


Рис. 6. График истории сходимости при уменьшении значения TimeScale

Также важное значение на сходимость решения имеет правильный выбор значения параметра TimeScale Control – управление масштабom времени. В программе Ansys CFX 12 этим параметром можно управлять тремя опциями: Auto Timescale, Local Time Scale Factor, Physical Time Scale. Если решение имеет нормальную сходимость, то обычно достаточно установленного по умолчанию режима Auto Timescale. В случае не сходимости или срыва решения (рис. 4) часто ситуацию можно исправить заданием нужного значения Physical TimeScale. Physical TimeScale позволяет задать фиксированное значение шкалы времени, которое будет использоваться при решении уравнений по всей области течения жидкости. Большие значения масштаба времени приводят к сильным колебаниям, расходимости и неустойчивости решения. Малые – к значительному увеличению времени расчета. В первом приближении можно оценить Physical TimeScale по следующей формуле:

$$TimeScale = k \cdot \frac{L}{v},$$

где $k = 0,1-1$ – коэффициент, L – длина домена вдоль потока, v – скорость.

Другой подход заключается в уменьшении значения TimeScale задаваемого программой CFX-Solver Ansys по умолчанию до значения,

когда решение начнет сходиться. На рис. 6 представлен график истории сходимости для расчета, аналогичного изображенному на рис. 4, но при уменьшении значения TimeScale в 4,5 раза. Как видно, изменение значения TimeScale позволило

избежать срыва решения. Но следует учесть, что сходимость решения будет происходить при значительном увеличении числа итераций и времени расчета.

INFLUENCE OF TURBULENCE MODEL ON COMPUTATIONAL INTEGRAL PARAMETERS OF THE AXIAL PUMP WITH SPECIFIC SPEED $n_s=570$

© 2013 D.G. Svoboda, A.A. Zharkovskiy

St. Petersburg State Polytechnical University

Influence of turbulence models on computational characteristics of the axial pump with specific speed $n_s=570$ r/pm is investigated. Recommendations about a choice of some computational parameters influencing convergence of the solution are made.

Key words: *axial pump, model, turbulence, computational grid, solution convergence*