

Отработка методики численного моделирования трехмерного вязкого течения в осерадиальном колесе центробежного компрессора в программном комплексе ANSYS CFX

11, ноябрь 2012

DOI: 10.7463/1112.0465832

Карлов А. М., Куфтов А. Ф.

УДК.621.515.1

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

alex-karlov@mail.ru

kuftov_a@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Проведение достоверного численного эксперимента в области газовой динамики турбокомпрессоров является одним из основных направлений совершенствования лопаточных аппаратов. Основной целью моделирования течений газа является получение достоверного результата, возможность точного предсказания, как интегральных характеристик ступени (КПД, коэффициента напора и т.д.), так и локальных параметров (скорость, давление). При этом верифицируемость параметров в данной точке рассматриваемого течения представляется наиболее важным этапом оптимизации геометрии элементов ступени (рабочего колеса, лопаточного диффузора) в рамках решения прямой задачи газодинамики.

В настоящее время в открытых источниках информации имеется достаточно много примеров использования пакетов программ вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования процессов в проточной части центробежных компрессоров [1-3]. Некоторые из них даже предлагают полноценную методику постановки трехмерного численного эксперимента для радиальных колес центробежных машин [1]. Однако остается открытым вопрос о возможности применения данных подходов к анализу процесса течения в осерадиальном колесе, как с методической точки зрения, так и в вопросах верификации результатов расчета. Целью данной работы является отработка методики численного эксперимента для анализа течения в осерадиальном колесе компрессора с последующей верификацией, как интегральных характеристик рабочего

колеса, так и сравнение локальных параметров с действительным распределением скорости и давления в проточной части.

Объектом численного моделирования в предлагаемой работе является осерадиальная ступень центробежного компрессора, систематические исследования которой проводились в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством проф. Куфтова А.Ф. [4].

Задание геометрии объекта, построение расчетной сетки и собственно численное моделирование течения выполнялось в соответствующих модулях программы ANSYS. Типовая схема рабочего проекта представлена на рисунке 1.

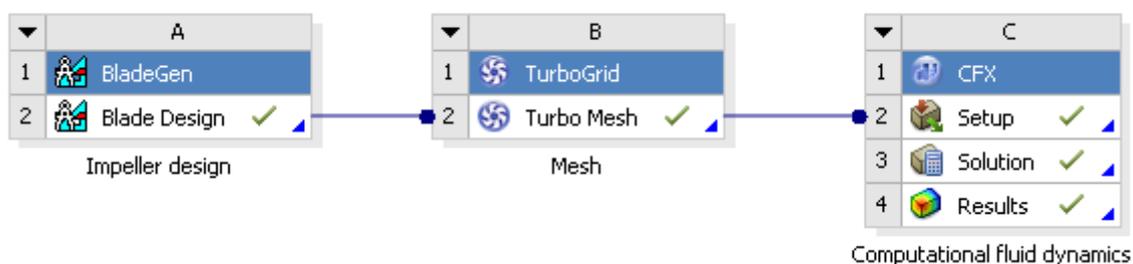


Рисунок 1 - Типовая схема рабочего проекта в ANSYS Workbench

1. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение 3-D модели осецентрированного колеса проводилось в модуле BladeGen пакета ANSYS. Меридиональный контур строился по рабочим чертежам колеса, профиль лопатки – по графикам распределения углов лопатки во втулочном и периферийном сечениях [4]. Рабочее окно подпрограммы BladeGen представлено на рисунке 2.

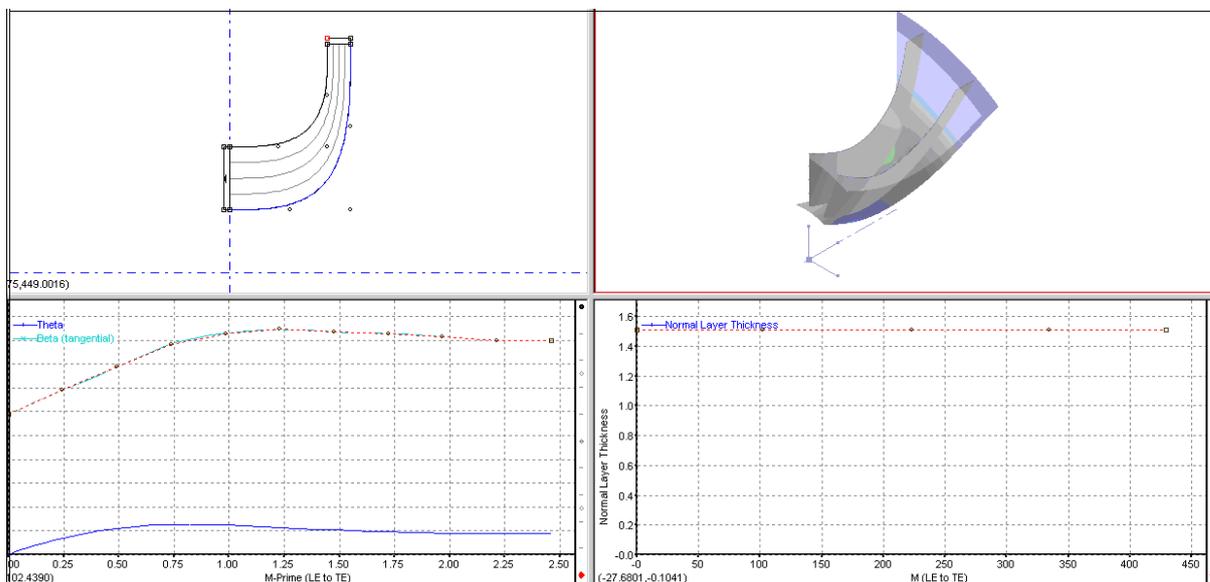


Рисунок 2 - Рабочее окно подпрограммы BladeGen

В виду осесимметричности задачи при моделировании рассматривалось обтекание одной лопатки (1/20 часть рабочего колеса). Пространственная геометрическая модель исследуемой области течения представлена на рисунке 3.

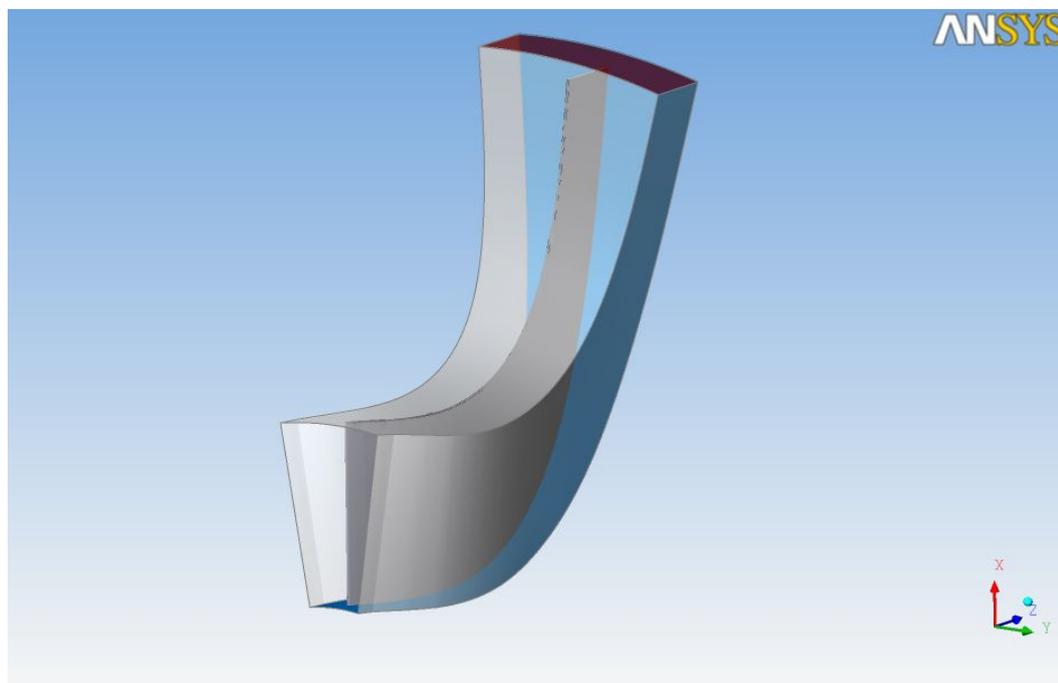


Рисунок 3 - Пространственная геометрическая модель исследуемой области течения

2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Расчетная сетка исследуемого объекта построена в модуле TurboGrid пакета ANSYS. При построении учитывались общеизвестные рекомендации [1, 5].

- Размеры расчетной сетки должны изменяться плавно. Расчетной сетке следует иметь сгущение к твердым стенкам. При этом не рекомендуется превышать отношение высот соседних элементов более 25 %.

- Построение расчетной сетки в пристеночных областях определяется выбором модели турбулентности. При описании турбулентности высокорейнольдсовым методом (модели SST, k-s), у стенки первый расчетный узел расчетной сетки должен попадать в область логарифмического слоя; значение приведенной координаты (y^+) в диапазоне от 30 до 300.

- Рекомендуется использовать для расчетов сетки с ячейками, у которых углы, образованные сеточными линиями, отличаются от прямых не более чем на $\pm 45^\circ$.

- Рекомендуется выбирать положение входной и выходной границ расчетной области на небольшом удалении от исследуемой области.

Авторы [1, 5] показали, что несоблюдение указанных условий приводит к появлению «сеточных эффектов»: внезапных скачкообразных изменений параметров в невязком ядре потока, противоречащих представлениям о характере движения газа.

С учетом вышеуказанных рекомендаций, все построенные сетки являются структурированными, состоят из элементов в форме гексаэдров и имеют сгущения в области твердых стенок.

Для изучения влияние количества элементов и способа построения расчетной сетки было реализовано четыре типа сетки: три из них построены вручную с использованием метода Control Point и отличаются количеством элементов 251304, 518525 и 1001958 - CP1,CP2,CP3 соответственно, и сетка построенная автоматически методом ATM optimized с 253004 ячеек (GO1).

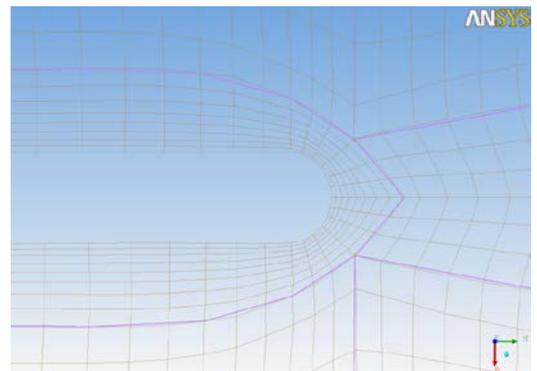
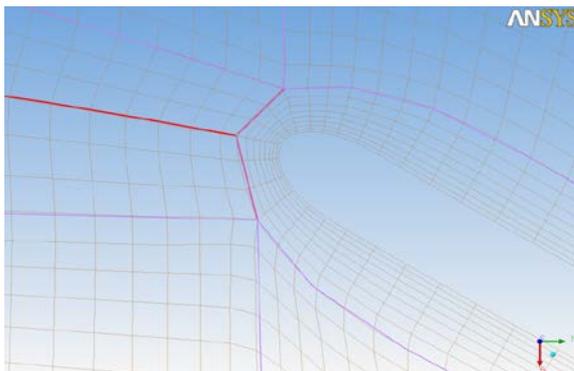
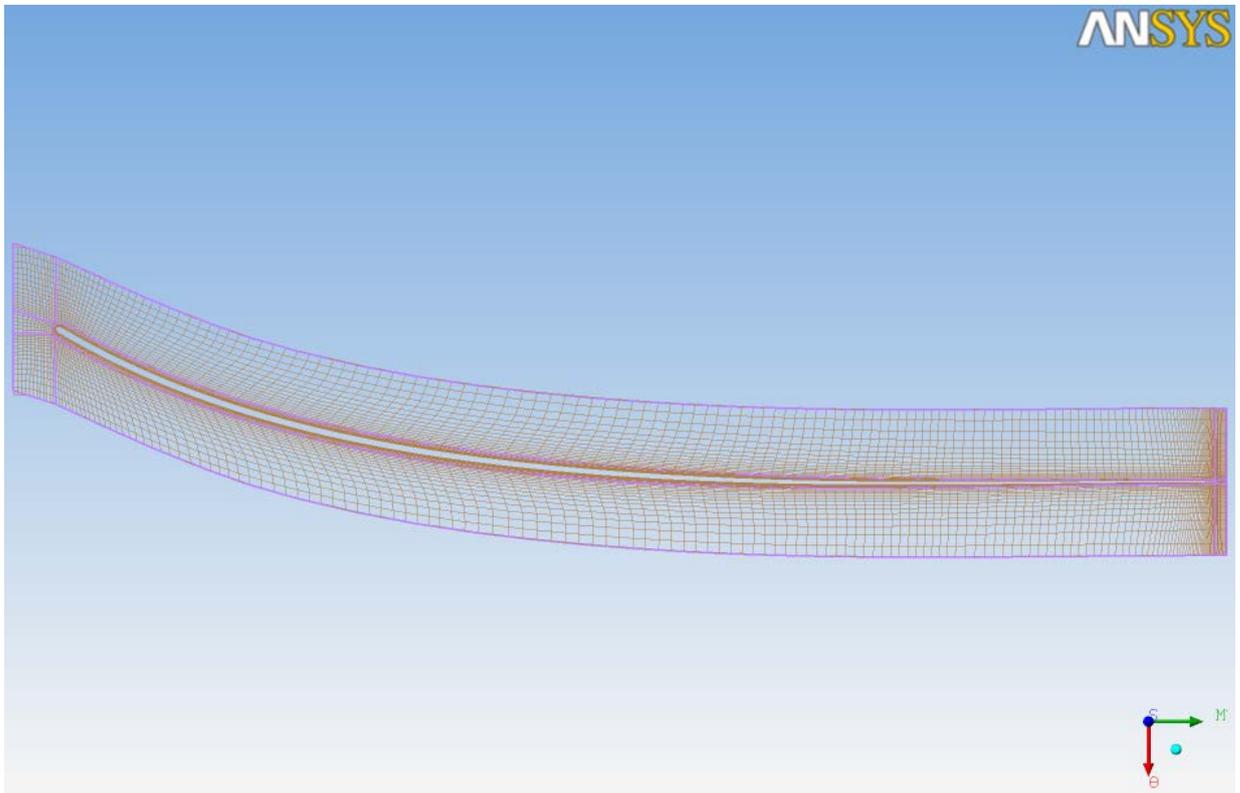


Рисунок 4 - Структурированная сетка CP1, количество элементов 251304, гексаэдры

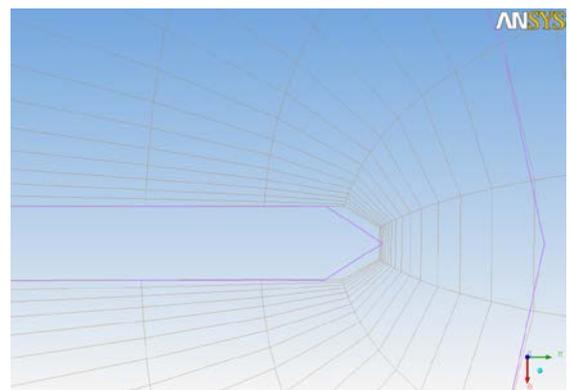
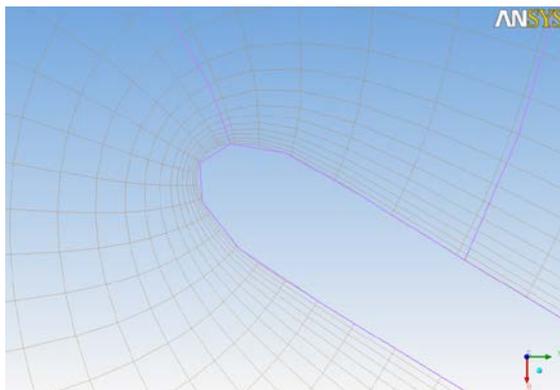
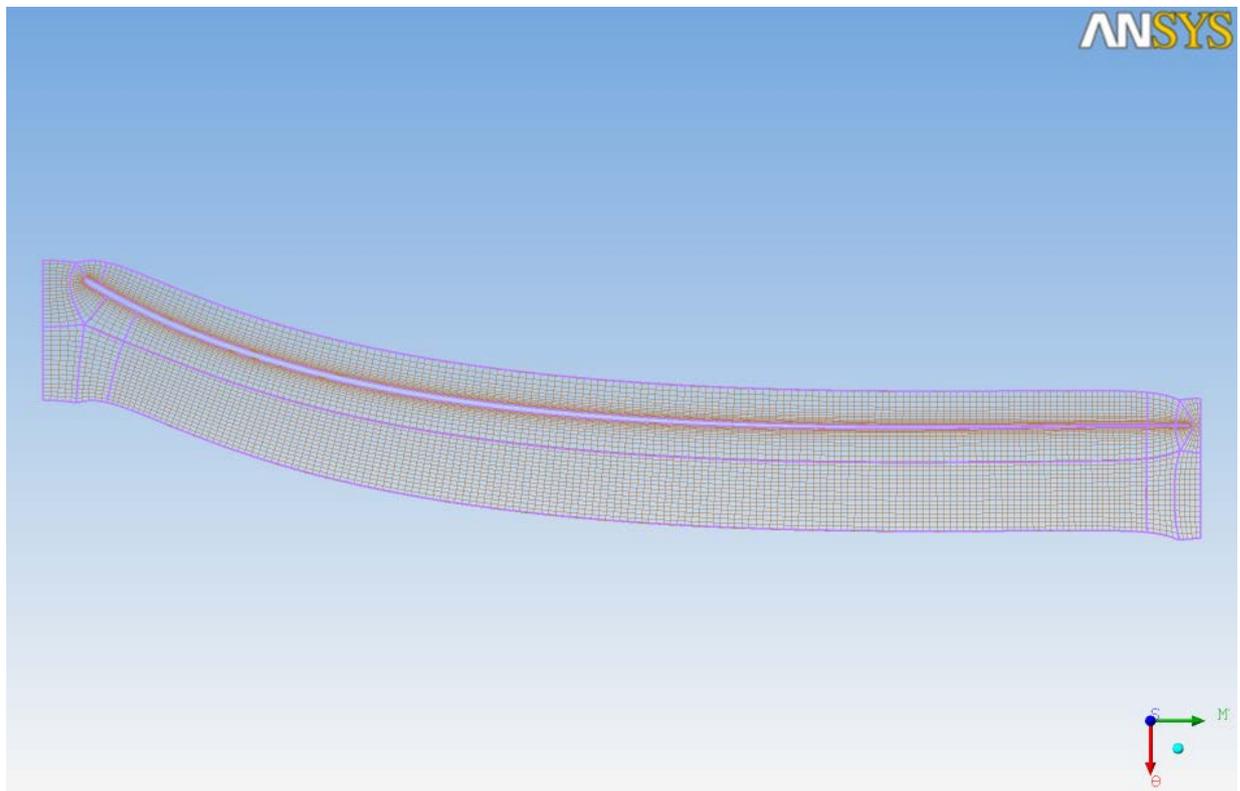


Рисунок 5 - Структурированная сетка ATM optimized, количество элементов 253004, гексаэдры

На рисунке 4 представлена сетка CP1 с локальным увеличением масштаба в области входной и выходной кромки. Сетки CP2, CP3 имеют аналогичную топологию. На рисунке 5 представлена топология сетки GO1. Из анализа сеток можно сделать следующие выводы:

- с увеличением количества элементов (сетки CP1, CP2, CP3) уменьшается размер ячеек O-сетки в пристенной области и радиальный габарит ячеек;
- для ATM сетки с данным количеством элементов не точно интерпретируется выходная кромка, что может повлиять на результаты расчета.

Сравнительные параметры сеток представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры сеток

Параметр	CP1	CP2	CP3	G01
Количество элементов	251 304	503 448	1 001 958	253 004
Топология	С контрольными точками	С контрольными точками	С контрольными точками	Автоматическая
Метод построения сетки	Н/У/С/Л	Н/У/С/Л	Н/У/С/Л	О/Н/С
Периодичность	полная	полная	полная	полная
Размер пристеночных элементов, мм	0.08	0.07	0.05	0.35748
Метод построения O-сетки	скорость расширения	скорость расширения	скорость расширения	пропорциональный
Фактор ширины O-сетки	1	1,5	1,7	1,7
Минимальный угол ячейки, град	26,6867	22,0833	17,6928	31,6481
Максимальный угол ячейки, град	157,128	159,229	164,285	148,348
Максимальное отношение объемов ячеек	34,73	24,997	25,0068	16,96
Максимальное отношение длин ребер	916,208	83,1132	89,5331	411,149

3. ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Граничные условия во всех вышеперечисленных вариантах реализовывались согласно следующей схеме – рисунки 6-8.

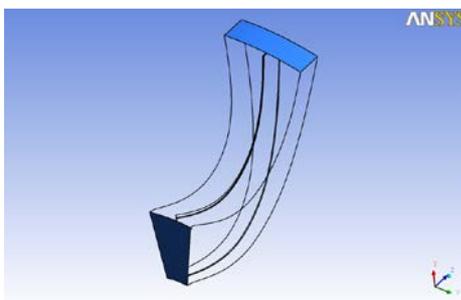


Рисунок 6 – Граничные условия типа Inlet, Outlet

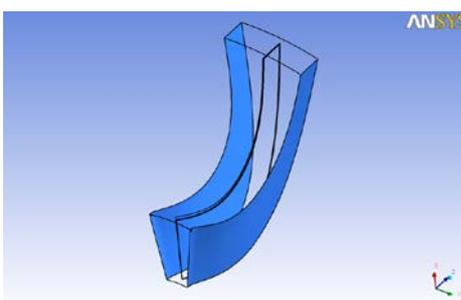


Рисунок 7 – Граничные условия типа Periodic

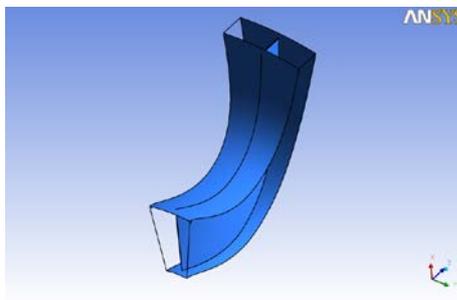


Рисунок 8 – Граничные условия типа No Slip Wall

При описании физической модели исследуемого течения использовались следующие типы граничных условий:

- **Inlet** – вход потока в расчетную область, полное давление 1 атм, статическая температура 288К.
- **Outlet** - выход потока из расчетной области, массовый расход газа 0,145 кг/с (2,9 кг/с – через ступень)
- **Periodic** – условие радиальной периодичности
- **No Slip Wall** - условие твердой стенки, свойствами которой является непроницаемость и прилипание молекул воздуха.

4. ВЫБОР МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Для проведения исследования влияния модели турбулентности на результаты расчета были выбраны модели SST, BSL ReS и SSG ReS. Модель Shear Stress Transport рекомендуют авторы статьи [5], как предлагающую «наилучшие качественные и количественные результаты» при анализе течения в радиальной ступени центробежного компрессора. Модели BSL ReS и SSG ReS представлены в руководстве пользователя программы ANSYS, как наиболее подходящие для расчета течений в лопаточных машинах (с учетом влияния Кориолисовых сил инерции на турбулентный пограничный слой). Таким образом, был произведен расчет трех моделей турбулентности на базе регулярной сетки CP1.

5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ

В рамках вычислительной гидродинамики движение вязкой сжимаемой жидкости можно представить системой уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (система уравнений Рейнольдса). Для окончательной формулировки задачи о расчете

турбулентных течений систему уравнений необходимо замкнуть одной из полуэмпирических моделей турбулентности.

Критерием сходимости решения системы уравнений Рейнольдса является величина остатка разности значений мгновенных скоростей для каждого уравнения в конце каждой итерации. Решение о том, что расчет сошелся, рекомендуется принимать, когда максимальный уровень остаточной разности (MAX) не выше чем $5,0E-4$ [5]. Как правило, значение RMS в этом случае будет на порядок ниже.

Таким образом, в качестве критерия сходимости расчетов было принято значение MAX $5,0E-4$.

6. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

1) *Влияние количества ячеек и способа построения сетки.* Расчет производился с использованием модели турбулентности Ментера Shear Stress Transport. Графическое сравнение результатов расчета представлено на рисунке 9.

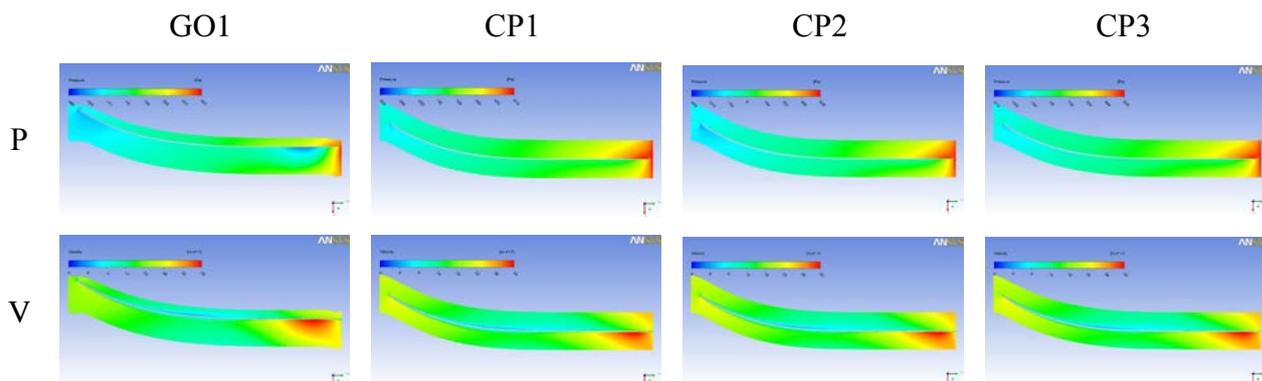


Рисунок 9. Качественное сравнение результатов расчета: p, v – распределение давления и скорости в межлопаточном пространстве в конформно отображенных плоскостях на расстоянии 0.5 между втулкой и периферией

Результаты расчета в виде распределения статического давления и локальных скоростей анализировались для трех конформно отображенных плоскостей, расположенных на относительных расстояниях 0,1; 0,5 и 0,9 между втулкой и периферией. Качественно и количественно сходные результаты получаются на сетках CP1, CP2 и CP3, за исключением зоны локального разряжения на сетке CP2 в области входной кромки. На всех сетках имеется зона локального провала скорости на стороне давления. Сетка GO1 предполагает наличие локальных зон разряжения в области входной и выходной кромки.

Распределения давлений и скоростей для радиусов 0,1 и 0,9 принципиально идентичны для всех исследуемых сеток.

2) *Влияние модели турбулентности.* Сравнение результатов расчета для всех вариантов представлено на рисунке 10.

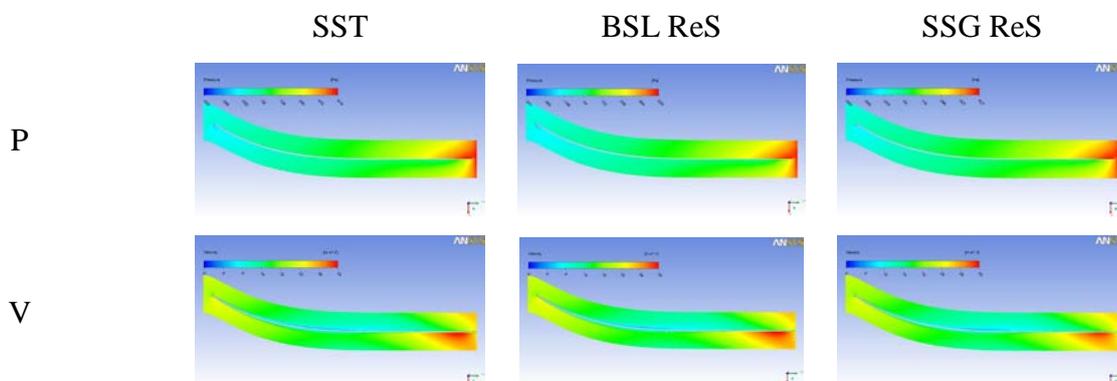


Рисунок 10 - Сравнение результатов расчета с использованием 3-х моделей турбулентности: обозначения см. рисунок 9

Рассматриваются распределения давлений и скоростей в конформно отображенной плоскости на радиусе 0,5. Все исследуемые модели турбулентности дают качественно и количественно схожие распределения давления и скорости в межлопаточном пространстве. Аналогичные результаты получаются для радиусов 0,1 и 0,9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам проведенного параметрического исследования можно сделать следующие выводы.

- 1) Количество ячеек и способ построения сетки в исследуемом варианте оказывают незначительное влияние на результаты расчета, что дает возможность использовать более грубую сетку (по количеству элементов) CP1 с меньшим количеством ячеек, тем самым уменьшая затраты на компьютерные вычисления.
- 2) Использование различных моделей турбулентности не дает принципиальных отличий в характере течения газа в межлопаточном пространстве, поэтому в качестве базовой модели предполагается использовать модель Shear Stress Transport.

На основании проведенного исследования предполагается выполнение верификации расчета течения вязкого газа в осерадиальном колесе центробежного компрессора с использованием следующих базовых параметров.

1) Структурированная сетка, состоящая из гексаэдров, с количеством элементов – 251304.

2) Граничные условия – Inlet: полное давления 1 атм, статическая температура 288К; Outlet: массовый расход 0,145 кг/с; Periodic: условие радиальной периодичности; No slip wall: условие твердой стенки, прилипание молекул и непроницаемость.

3) Параметры сходимости решения: MAX 5,0E-4.

4) Модель турбулентности: SST.

Список литературы

1. Гамбургер Д.М. Численное моделирование течения вязкого газа в центробежной компрессорной ступени: методика и результаты : дис. ... канд. техн. наук.- СПб.: СПбГПУ, 2009. - 190 с.
2. Сайт фирмы CAE-Services.- Режим доступа: www.cae-services.ru (дата обращения 06.10.2012).
3. Сайт ООО «Инжиниринговая компания «ТЕСИС».- Режим доступа: www.tesis.com.ru (дата обращения 06.10.2012).
4. Куфтов А.Ф. Обобщенный метод расчета и профилирования центробежных компрессоров и насосов на основе коэффициентов аэрогидродинамических нагрузок : дис. ... докт. техн. наук.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. - 348 с.
5. Галеркин Ю.Б., [Гамбургер Д.М.](#), [Епифанов А.А.](#) Анализ течения в центробежных компрессорных ступенях методами вычислительной гидрогазодинамики // [Компрессорная техника и пневматика](#).- 2009.- № 3.- С. 22-32.

Working off the methodology of numerical simulation of three-dimensional viscous flow in axially radial impeller of centrifugal compressor using ANSYS CFX

11, November 2012

DOI: [10.7463/1112.0465832](https://doi.org/10.7463/1112.0465832)

Karlov A.M., Kuftov A.F.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

alex-karlov@mail.rukuftov_a@mail.ru

The article presents a methodology for numerical simulation of viscous flow in a centrifugal compressor wheel of axially radial type using the ANSYS CFX. It shows the influence of various factors, such as the size of the cells and the method of constructing the grid, the choice of turbulence model, on calculation results. The graphical comparison of calculation results for different variable parameters is also presented. Optimal values of mesh size and turbulence model for further verification of the numerical experiment were established.

Publications with keywords: [methods](#), [numerical modelling](#), [turbocompressor](#), [Ansys CFX](#)

Publications with words: [methods](#), [numerical modelling](#), [turbocompressor](#), [Ansys CFX](#)

References

1. Gamburger D.M. *Chislennoe modelirovanie techeniia viazkogo gaza v tsentrobezhnoi kompressornoj stupeni: metodika i rezul'taty. Kand. diss.* [Numerical simulation of flow of viscous gas in the centrifugal compressor stages: methods and results. Cand. diss.]. St. Petersburg, SPbGPU, 2009. 190 p.
2. *Sait firmy CAE-Services* [Website of the company CAE-Services]. Available at: www.cae-services.ru, accessed 06.10.2012.
3. *Sait OOO «Inzhiniringovaya kompaniya «TESIS»* [Website of the company "Engineering Company" TESIS "]. Available at: www.tesis.com.ru, accessed 06.10.2012.
4. Kuftov A.F. *Obobshchennyi metod rascheta i profilirovaniia tsentrobezhnykh kompressorov i nasosov na osnove koeffitsientov aerogidrodinamicheskikh nagruzok. Dokt. diss.* [The generalized method of calculation and profiling of centrifugal compressors and pumps based on the coefficients aerohydrodynamic loads. Dr. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 1994. 348 p.
5. Galerkin Iu.B., Gamburger D.M., Epifanov A.A. Analiz techeniia v tsentrobezhnykh kompressornykh stupeniakh metodami vychislitel'noi gidrogazodinamiki [Analysis of the flow in centrifugal compressor stages by methods of computational hydrogasdynamics]. *Kompressorovaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor equipment and pneumatics.], 2009, no. 3, pp. 22-32.