

Численное моделирование большого масштабного центробежного компрессора

Р.М. Коптилин, аспирант кафедры Информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье представлено численное моделирование большого масштабного центробежного компрессора (LSCC). Выбор модели потока, моделирование турбулентности и численного метода рассматривается на примере CFD решателя Fine/Turbo. Рассмотрены проблемы CFD моделирования, а именно выбор модели турбулентности. В ходе работы была изучена геометрия объекта, построена расчетная модель, проанализированы входные и выходные параметры, получены результаты численного моделирования (эффективность, число Маха и т.д.).

CFD, модель, центробежный компрессор, турбулентность, сетка, КПД.

Numerical simulation of a large-scale centrifugal compressor

R.M. Koptilin, post-graduate student of the Department of Information Technologies and Control Systems,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article presents a numerical simulation of a large-scale centrifugal compressor (LSCC). The choice of flow model, turbulence simulation and numerical method is considered on the example of CFD fine/Turbo solver. The problems of CFD modeling, namely the choice of turbulence model, are considered. In the course of the work, the geometry of the object was studied, the calculation model was built, the input and output parameters were analyzed, the results of numerical modeling (efficiency, Mach number, etc.) were obtained.

CFD, model, centrifugal compressor, turbulence, mesh, efficiency.

Последние 15-20 лет характеризуются большим прогрессом в численном моделировании 3D вязких течений. За это время разработали много CFD (вычислительная гидродинамика) решателей. Вычисление 3D течения вязкой жидкости путем интегрирования Рейнольдса усредненный Навье-Стокса уравнений [1], становится обычной практикой для турбомашин приложений. В настоящее время исследователь плотно подходит к моделированию потока тонкой структуры, и в результате точно прогнозирует потери кинетической энергии в каскадах. Это позволяет эффективно решать проблему оптимизации параметров турбомашин.

Компрессор – устройство, предназначенное для непрерывного сжатия рабочего тела до требуемого уровня степени повышения давления за счет подвода механической энергии к потоку рабочего тела [2]. В данной статье рассматривается большой масштабный центробежный компрессор (LSCC) (рисунок 1). LSCC – это экспериментальная установка, предназначенная для дублирования существенной физики потока высокоскоростных полей дозвукового центробежного компрессора в низкоскоростной машине большого размера. Рабочее колесо имеет 20 полных лопастей с обратным смещением 55°. Он включает постоянный зазор 2,54 мм между наконечником лопатки рабочего колеса и кожухом, от входа рабочего колеса до выхода рабочего колеса. Это составляет около 1,8% от высоты лопатки на выходе из рабочего колеса. За рабочим колесом следует диффузор без лопасти, который создает осесимметричное граничное условие оттока, что желательно для анализа CFD изолированного ряда лопаток. Оригинальный диффузор без лопастей был модифицирован для устранения области обратного потока, возникшей на задней стенке диффузора. Эта модификация обеспечила отсутствие обратного потока на станциях ниже по потоку от рабочего колеса.

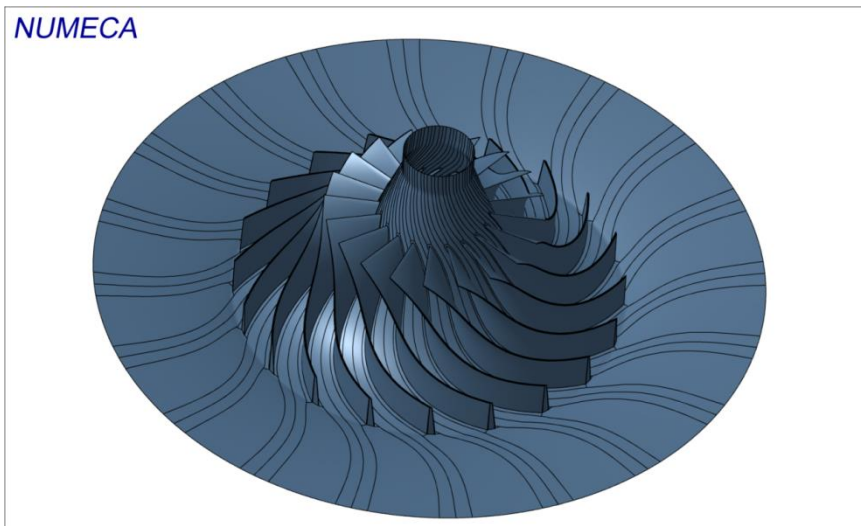


Рисунок 1 – Большой масштабный центробежный компрессор (LSCC)

Главная цель исследования заключается в том, чтобы продемонстрировать способность FINE/Turbo моделировать поток в высокоскоростном дозвуковом центробежном компрессоре с использованием модели турбулентности с высоким числом Рейнольдса k -epsilon. Так же в статье рассматривается проблема выбора модели турбулентности.

В настоящее время выбор модели турбулентности для расчета является одной из самых важных проблем CFD. Поэтому выбор модели турбулентности может быть главным вопросом. Пристеночные турбулентные модели, как алгебраические, так и дифференциальные, такие как модель Болдуина-Ломакса [5] и модель Спаларта-Аллмараса [6], показывают себя как хороший выбор для однокаскадных течений в расчетных условиях. В условиях нестационарного потока при наличии массивных разделений, взаимодействие ниже по потоку лопастей или некоторые другие явления потока, то пристеночные модели турбулентности не пригодны к использованию, требуются более сложные модели. Модель турбулентности SST k - ω оказывается достаточно адекватной для широких типов турбореактивных течений.

Большинство моделей турбулентности само противоречивы и часто создают нефизические положительные нормальные напряжения Рейнольдса. Это приводит к чрезмерной турбулентности для неравновесных потоков разделения. Ограничение реализуемости, предложенное Ламли, устраняет эту отрицательную особенность.

Все расчеты проводились с помощью программного комплекса Numeca(Fine\turbo). FINE/Turbo – первый в мире узкоспециализированный расчетный 3D-CFD программный комплекс (ПК) высокого уровня, ориентированный на решение специализированных задач турбомашиностроения (подходит для любых типов лопаточных машин), предназначен для CFD моделирования турбомашин, расчетный CAE программный комплекс высокого уровня, ориентированный на решение специализированных CFD задач турбомашиностроения и лопаточных машин [3]. FINE/Turbo является самым быстрым CFD пакет для вращающихся машин с несжимаемых и сжимаемых жидкостей от дозвуковых до гиперзвуковых режимов течения [4].

С помощью программного продукта FINE/Turbo импортирована геометрия объекта (LSCC) и построена расчетная сетка. В программном комплексе FINE/Turbo строиться блочно-структурированная сетка (рисунок 2 и рисунок 3) при помощи модуля генерации сетки Autogrid5.

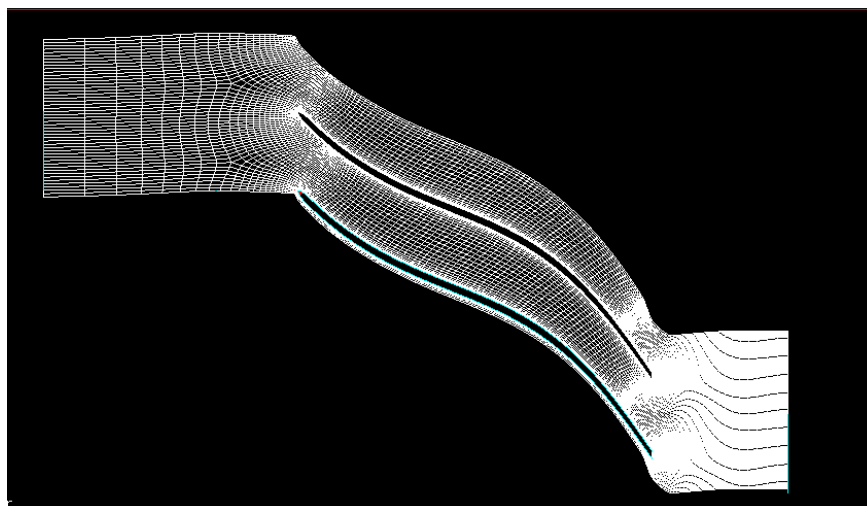


Рисунок 2 – Блочнo-структурированная сетка венца

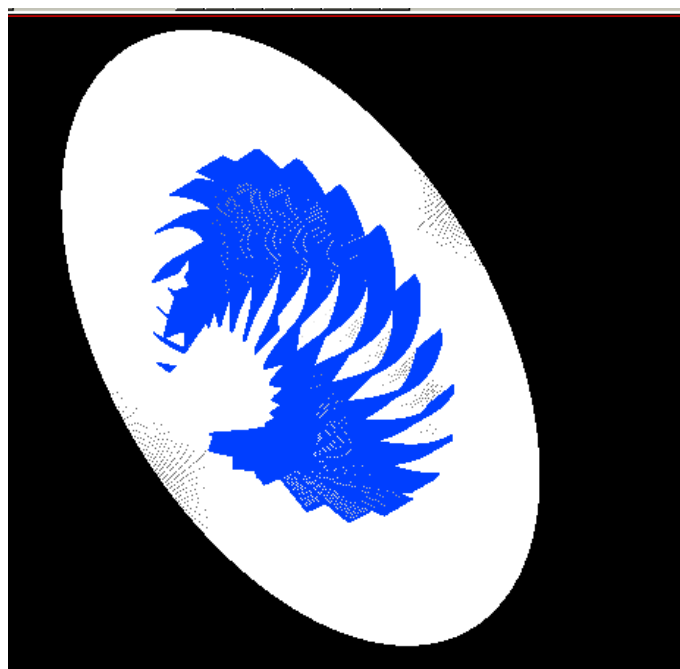


Рисунок 3 – 3D-модель сетки LSCC

Основные параметры сетки:

- тип венца **Centrifugal Impeller**,
- количество лопаток 20,
- ротор, скорость вращения 1862.4 об/мин,
- количество ячеек сетки 1577164.

Рабочей жидкостью является воздух, рассматриваемый как настоящий газ. Параметры рабочего тела представлены на рисунке (рисунок 4).

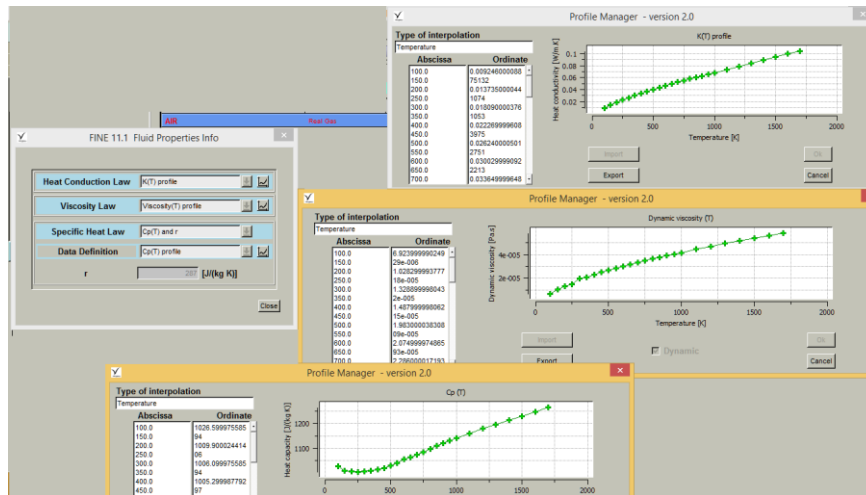


Рисунок 4 – Параметры газа

Расчетная область моделируется исходя из следующих допущений:

- Общие условия выбираются на входе в компрессор;
- Массовый расход регулируется на выходе;
- Ступица рабочего колеса движется вместе с лопастью ротора;
- Весь саван неподвижен;
- Все границы сплошной стенки предполагаются адиабатическими.

Граничные условия на входе и выходе представлены на рисунках (рисунок 5 и рисунок 6).

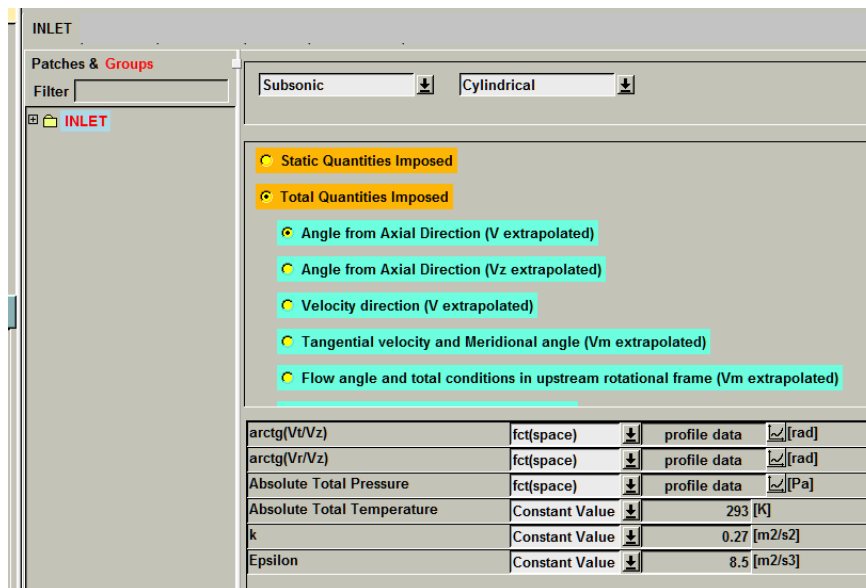


Рисунок 5 – Граничные условия на входе

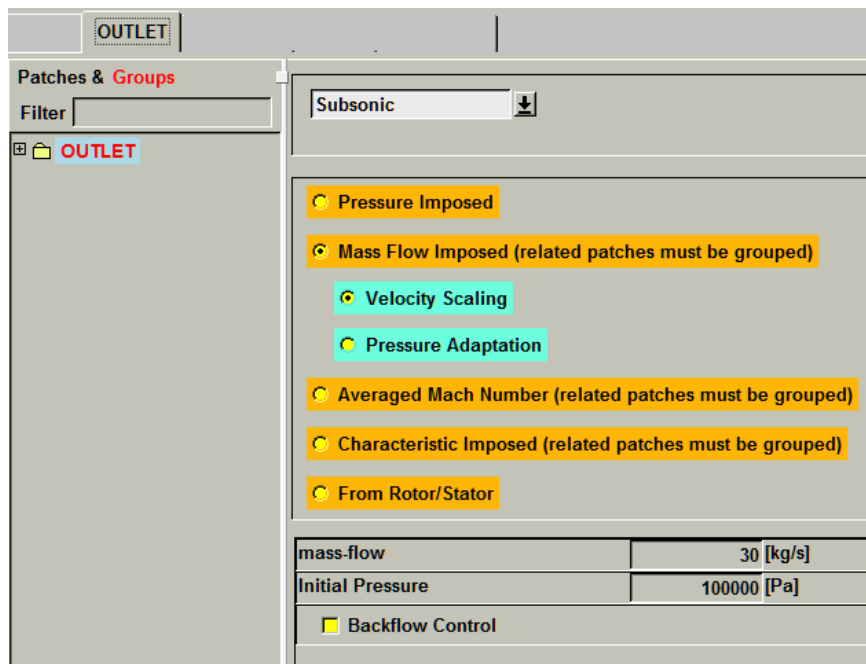


Рисунок 6 – Граничные условия на выходе

Проект включает в себя одно вычисление, расчет тончайшей сетки с использованием модели турбулентности k-epsilon с расширенными функциями стенки, в качестве математической модели используется модель Навье-Стокса (рисунок 7).

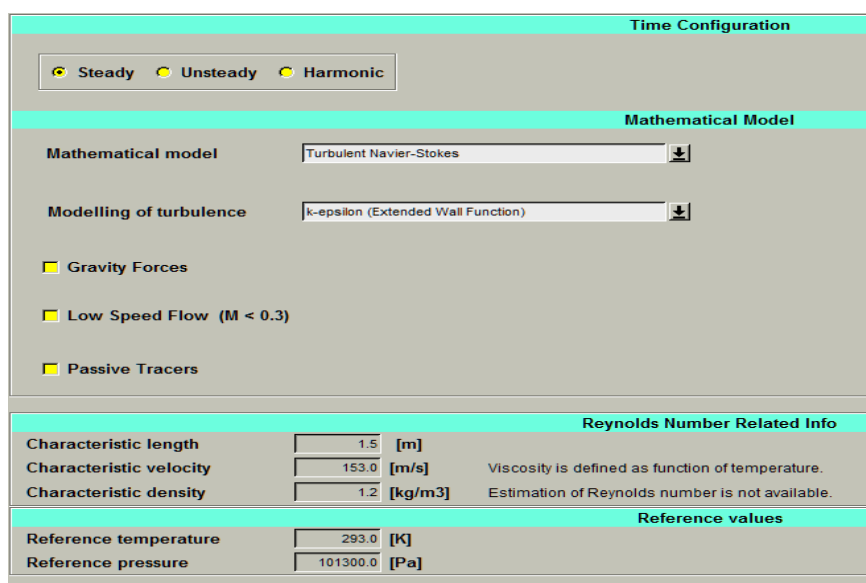


Рисунок 7 – Параметры вычислительной модели

При данном расчете используется полная многосеточная стратегия (3 уровня сетки на самой мелкой сетке) с максимум 300 итерациями, выполняемыми на каждом уровне сетки. Конвергенция по мелкой сетке (затухание на 5 порядков) достигается примерно за 1000 итераций. Полная стабилизация глобальных характеристик может наблюдаться после 1000 итераций на мелкой сетке. Пиковая память (RAM), требуемая решателем потоков во время вычисления.

Результаты расчетного исследования представлены на рисунках и графиках (рисунок 8, рисунок 9, рисунок 10.). Сходимость решения достигается на 895 итерации (в расчет 2100 итераций), в данной точке КПД составляет 85,49% , массовый расход 30 кг/с.

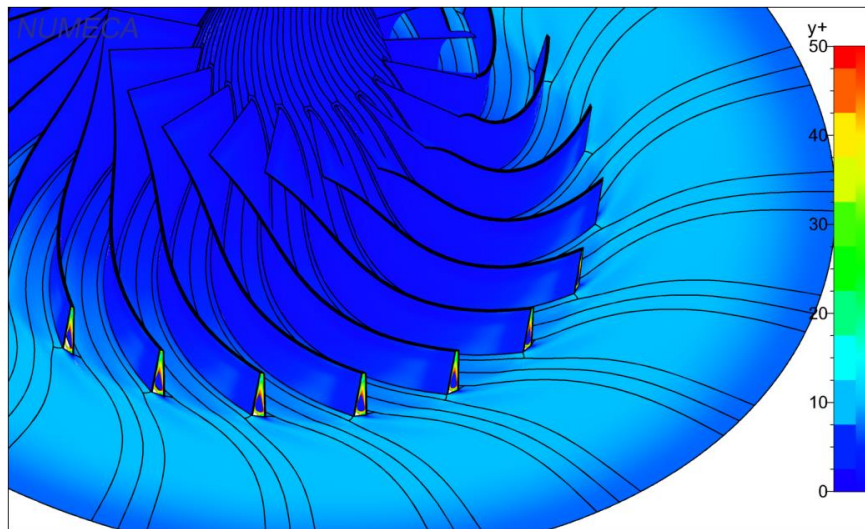


Рисунок 8 – Плотность сетки вблизи сетки

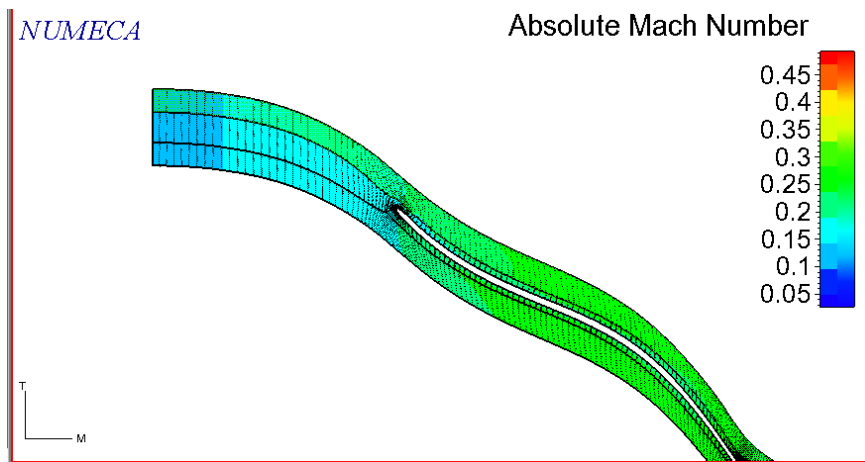


Рисунок 9 – Распределение числа Маха

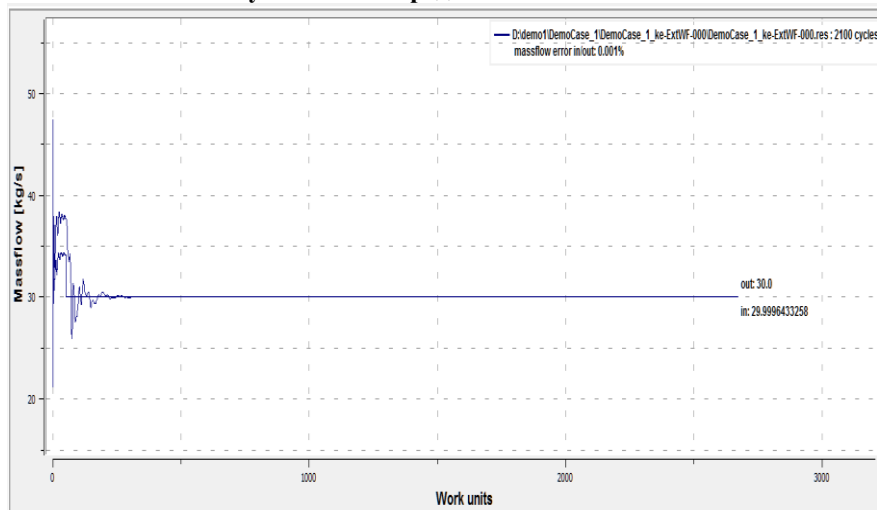


Рисунок 10 – График расхода рабочего тела

В настоящее время 3D-моделирование вязкого течения осуществляется практически для всех типов турбомашин. Возможно, смоделировать качественно и количественно каскадные потоки и прогнозировать эффективность турбомашин, а именно потери кинетической энергии, реакции и эффективности. Тонкая структура потока 3D турбомашин позволяет моделировать и получать такие эффекты, как вторичные вихри потока, распространение следа через каскад и другие, все эти эффекты могут быть получены численно.

Литература

1. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD // 2nd ed., Palm Drive: DCW Industries Inc. 2004. P. 540.
2. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин // Самара: ФГУП «Издательство Самарский Дом печати», 2003. 336с.
3. Fine/Turbo [Электронный ресурс]. URL: <https://http://www.numeca-ru.com/> (дата обращения: 19.10.2017).
4. Коптилин Р.М., Гайнутдинов А.В. Обзор рынка CAE решений для гидро-, газодинамики турбомашин // Информационно-технологический Вестник, № 3(13). 2017. С. 94-105.
5. Baldwin B.S., Lomax H. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows // AIAA Paper, No 257. 1978. P. 1-8.
6. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // La Recherche Aerospatiale, Vol. 1, No 1. 1994. P. 5-21.