

Моделирование турбулентных течений на вращающемся диске с использованием многопроцессорной вычислительной системы и сравнение с экспериментом

А.О.Рубцов, Р.А.Измайлов, Ю.Я.Болдырев

Санкт-Петербургский политехнический университет.

Поиск адекватных реальным физическим течениям методов математического описания турбулентных течений или, как принято говорить, моделей турбулентности вот уже на протяжении более 100 лет (начиная с классических работ О. Рейнольдса) занимает умы многих выдающихся математиков и механиков. Это объясняется как исключительной сложностью турбулентности, как физического явления, так и тем обстоятельством, что именно турбулентная форма движения газов и жидкостей наиболее часто реализуется в природе и в различных технических приложениях. Специфика ситуации состоит в том, что в отличие от многих других физических явлений, для описания которых строгие математические модели отсутствуют, турбулентные течения, согласно современным представлениям, подчиняются классическим уравнениям Навье-Стокса, и в этом смысле проблема может считаться давно решенной. Однако, несмотря на фантастический прогресс мощности вычислительной техники, наблюдаемый в последние десятилетия, ее возможности все еще недостаточны для решения этих уравнений при представляющих практический интерес высоких числах Рейнольдса. И даже по самым оптимистичным прогнозам, будут оставаться таковыми, по крайней мере, вплоть до второй половины, а то и до конца XXI века [1].

В рамках описываемой работы была проведена серия математических экспериментов по моделированию турбулентности воздушного потока, натекающего на вращающийся диск, с использованием различных моделей турбулентности, для последующего сравнения результатов с реальными экспериментальными данными.

Экспериментальные данные и параметры проводимого математического эксперимента взяты из статьи N. Gregory, J.T. Stuart, W.S. Walker “On the stability of tree-dimensional boundary layers with application to the flow due to a rotating disk” 1955.

Расчеты проводились в рамках программного комплекса ANSYS CFX, а именно в рамках его многопроцессорной версии. Из-за большой вычислительной ресурсоемкости задачи все расчеты проводились на базе высокопроизводительного вычислительного кластера Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета с пиковой производительностью 3.4 TFLOPS. Использовалось до 64 вычислительных ядер одновременно.

Для проведения расчетов было построено несколько вариантов расчетных сеток, содержащих от 500 тысяч до 13 млн. элементов, причем во всех вариациях сетки наибольшее число элементов всегда было сосредоточено вблизи поверхности диска, на

которую натекает поток. Из-за огромного числа неизвестных данная задача может быть решена за разумное время лишь с использованием огромных вычислительных мощностей, таких как суперкомпьютер. Для распределения вычислений между несколькими процессорами в программном комплексе ANSYS CFX проводится разбиение расчетной области задачи на части, расчеты в каждой из которых проводит отдельный процессор, после чего решения стыкуются на границах. Для разбиения расчетной области рассматриваемой задачи использовался алгоритм MeTiS.

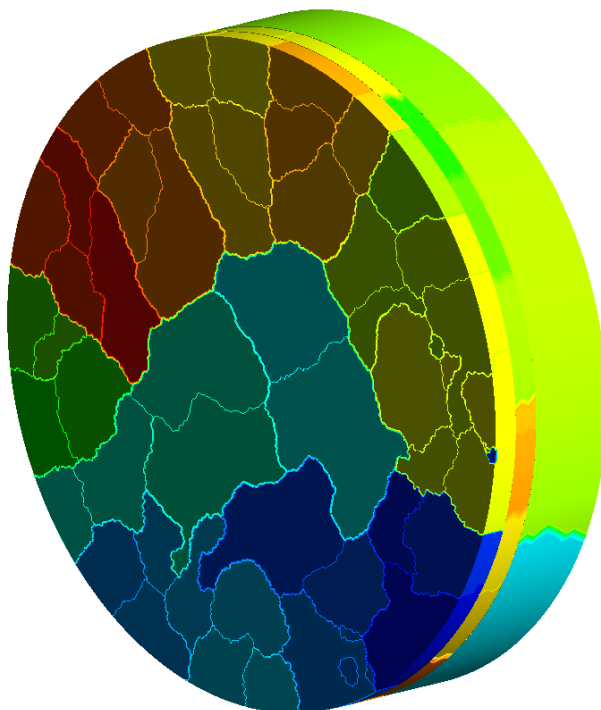


Рисунок 1. Результат разбиения части расчетной области с использованием алгоритма MeTiS для 64 ядер.

Ключевой целью исследования являлся поиск такой расчетной сетки и модели турбулентности, при которых результаты математического эксперимента качественно повторяли бы реальные результаты физического эксперимента. Главной особенностью результатов реального физического эксперимента являлось наличие спиральных вихревых завихрений вблизи поверхности диска.

Первым предположением природы возникновения этих завихрений были отрывы течения от поверхности вращающегося диска. Исходя из этого, был построен первый вариант разбиения расчетной области и соответственный вариант расчетной сетки, особенностью которой являлось наличие небольшого слоя сгущения расчетных элементов вблизи поверхности диска. В результате расчетов на данной сетке был получен характерный для данной задачи вид линий тока. Также было замечено, что все течение в расчетной области можно разделить на три вида:

1. Ламинарное прямолинейное течение на достаточном расстоянии перед вращающимся диском
2. Спиральное завихрение на поверхности диска
3. Сильная турбулентность (перемешивание линий тока) с торцов диска и за ним

Также было получено, что ближе к краям диска линии тока очень схожи по характеру со спиральными завихрениями, полученными в физическом эксперименте.

Были получены характерные графики скорости и давления на срезе вблизи поверхности диска (внутри слоя сгущения расчетных элементов). Нужно отметить, что графики являются осесимметричными без каких-либо признаков отрывов течения. Таким образом, они никак не выявляют искомых спиральных завихрений. Для решения использовались различные стационарные модели турбулентности, при этом качественно результаты расчетов для различных моделей не отличаются.

При решении нестационарной задачи с использованием всех выбранных моделей турбулентности был получен несколько другой характер течения. Для решения нестационарной задачи в рамках программного комплекса ANSYS-CFX необходимо задавать начальное состояние. Для решения всех нестационарных задач в данной работе в качестве начального состояния берется решение стационарной задачи с использованием SST модели турбулентности.

Нестационарное решение задачи для рассматриваемой расчетной сетки выявляет характерное спиральное завихрение в центральной части диска, которое отсутствует в стационарных решениях. При использовании LES модели турбулентности данное завихрение является наиболее заметным. Однако искомых спиральных завихрений нестационарное решение задачи на рассматриваемой расчетной сетке не выявляет даже при сильном измельчении сетки (с 2.4 млн. элементов до 8.5 млн.).

Далее рассматривался другой вариант разбиения расчетной области и построения соответствующей расчетной сетки. В этом варианте толщина измельченного слоя вблизи поверхности диска бралась на порядок большей. Для этого варианта решалась как стационарная, так и нестационарная задача с использованием различных моделей турбулентности. Решение стационарной задачи выявило спиральные завихрения близкие к полученным в эксперименте. Нестационарное решение показало, что данные завихрения являются результатом развития вихря, расположенного в области перед центральной частью диска. При использовании расчетной сетки, состоящей из 11.9 млн. элементов, были получены искомые спиральные завихрения, качественно повторяющие результаты физического эксперимента.

Таким образом, было показано, что при аккуратном физическом эксперименте и хорошем математическом моделировании, в рамках рассматриваемой задачи, результат совпадает.

По итогам использования нескольких различных моделей турбулентности, в рамках рассматриваемой задачи, можно сделать вывод о том, что при использовании недостаточно мелкой расчетной сетки, для решения нестационарной задачи рассмотренные модели турбулентности дают практически идентичные результаты, которые качественно описывают лишь общий характер течения. При решении нестационарной задачи на недостаточно мелкой сетке наилучший результат по выявлению особенностей течения показала LES модель турбулентности. При решении задачи на достаточно мелкой расчетной сетке все рассмотренные модели турбулентности дают качественно хорошие результаты, описывающие достаточно мелкие особенности течения. Однако, использование LES модели турбулентности для решения нестационарной задачи, в отличие от других моделей, позволяет понять причины появления таких особенностей.

Таким образом, можно говорить о том, что наилучшие результаты среди рассмотренных моделей турбулентности показала LES модель, используемая для решения

нестационарной задачи на расчетной сетке соответствующего качества. При ее использовании были выявлены все основные особенности течения в рассматриваемой задаче.

Существенных различий в результатах, полученных при использовании моделей турбулентности для решения стационарной задачи, нет. Время решения поставленной задачи с использованием этих моделей турбулентности на вычислительном кластере практически не отличается, но быстрее проводились расчеты при использовании SA модели турбулентности.

Список использованных источников

1. **А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур.** Возможности и ограничения современных подходов к моделированию турбулентности в аэродинамических расчетах. Учебное пособие, СПбГПУ, 2012. С. 88.
2. **N. Gregory, J. T. Stuart and W. S. Walker** “On the Stability of Three-Dimensional Boundary Layers with Application to the Flow Due to a Rotating Disk”, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 1955 248, doi: 10.1098/rsta.1955.0013.