

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТАХ НА ОСНОВЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

Ю.Я. Болдырев, А.О. Рубцов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поиск приемлемых для практики технологий математического описания турбулентных течений или, как принято говорить, моделей турбулентности уже на протяжении более 100 лет (начиная с классических работ О. Рейнольдса) занимает умы многих выдающихся математиков и механиков. Это объясняется как исключительной сложностью самого феномена турбулентности как физического явления, так и тем, что именно турбулентная форма движения газов и жидкостей наиболее часто реализуется в природе и, соответственно, должна учитываться при расчетах в различных технических приложениях. Согласно современным представлениям, турбулентные течения подчиняются классическим уравнениям Навье–Стокса. Однако, несмотря на значительный прогресс вычислительной техники, наблюдаемый в последние десятилетия, ее возможности все еще недостаточны для решения этих уравнений при представляющих практический интерес высоких числах Рейнольдса, то есть при развитой турбулентности. И даже по самым оптимистичным прогнозам, ситуация останется таковой, по крайней мере вплоть до второй половины – конца XXI века.

При этом общий прогресс вычислительной аэродинамики не мог не сказаться на состоянии проблемы моделирования турбулентности. В частности, в последние годы все большее применение находят подходы к моделированию турбулентности, базирующиеся на «первых принципах» аэродинамики, таких как метод прямого численного моделирования (DNS – Direct Numerical Simulation) и метод моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). Отметим, что такие подходы крайне вычислительно трудоемки. Например, моделирование турбулентности по методу DNS с необходимым для практики числом узлов сетки порядка 10^{16} и числом шагов по времени порядка $10^{7.7}$ на компьютере производительностью в 1 терафлоп должно занять около 5000 лет. Также отметим, что для достижения необходимой точности расчета аэродинамических характеристик, независимо от выбранного метода моделирования турбулентности, требуется учитывать большое число переменных, что приводит к необходимости производить расчеты на суперкомпьютере. Для сравнения можно рассмотреть таблицу, приведенную в учебном пособии А.В. Гарбарука, М.Х. Стрельца и М.Л. Шура (2012 г.) [1], иллюстрирующую объемы необходимых вычислительных ресурсов и перспективы практического применения различных методов моделирования турбулентных течений.

Таблица 1

Метод	Необходимое число узлов сетки	Необходимо число шагов по времени	Год готовности ¹
3D Steady RANS	10^7	10^3	1985
3D Unsteady RANS	10^7	$10^{3.5}$	1995

¹ Подразумевается, что расчет производится на самых мощных компьютерах из доступных.

DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

Кратко остановимся на наиболее востребованных моделях турбулентности. В настоящее время для моделирования турбулентности применяются такие методы:

- RANS-модель (Reynolds Averaged Navier-Stokes) – уравнения Рейнольдса получаются из системы уравнений Навье–Стокса путем использования процедуры осреднения, предложенной О. Рейнольдсом. Система уравнений, полученная после осреднения, является незамкнутой, поскольку связь между турбулентными составляющими тензора напряжений и вектора плотности теплового потока с параметрами осредненного течения неизвестна. Эта связь должна быть доопределена с помощью дополнительных соотношений, которые и представляют собой модель турбулентности.
- Полуэмпирические модель Спаларта-Аллмараса (содержит одно дифференциальное уравнение переноса для модифицированной турбулентной вязкости) и модель Ментера (содержит два дифференциальных уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности и удельной скорости её диссипации). SA-модель, как правило, «затягивает» отрыв пограничного слоя, индуцированный неблагоприятным продольным градиентом давления. Обе эти модели занижают темп релаксации пограничного слоя, формирующегося вниз по потоку от точки присоединения, к своему равновесному состоянию и значительно завышают размеры так называемого «углового отрыва», т.е. отрыва от поверхности двухгранного угла при наличии неблагоприятного градиента давления. При этом, например, для течений с сильной кривизной линий тока и вращением ни одна из этих моделей не позволяет получить результаты, удовлетворяющие современным требованиям к точности расчета аэродинамических характеристик.
- Метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation), уравнения которого могут быть получены из уравнений Навье–Стокса путем представления всех переменных в виде суммы крупно- и мелкомасштабных составляющих и последующего применения процедуры фильтрации.
- Метод отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation), который был предложен в качестве альтернативы RANS- и LES-метода при расчете пристеночных течений с обширными отрывными зонами, для которых RANS модели не способны обеспечить приемлемую точность, а LES требует чрезмерно больших вычислительных ресурсов.
- Метод прямого численного интегрирования DNS, который базируется на единственном общепринятом в настоящее время допущении о том, что уравнения Навье–Стокса адекватно описывают не только ламинарные, но и турбулентные течения. В рамках этого метода расчет турбулентных течений производится путем непосредственного (без предварительного осреднения) численного решения уравнений Навье–Стокса. При этом, вне зависимости от характера рассматриваемого течения, должны использоваться трехмерные нестационарные уравнения Навье–Стокса, так как турбулентность является принципиально трехмерным и нестационарным явлением. Кроме того, DNS-метод подразумевает необходимость достаточно точного разрешения всех пространственно-временных масштабов турбулентности, из чего следует необходимость использования суперкомпьютеров при расчетах.

Для эффективного применения этих и других методов моделирования турбулентности и проведения расчетов на суперкомпьютерах существует большое количество различных программных комплексов. Подавляющее большинство таких комплексов

имеют параллельную версию для эффективного использования многопроцессорных компьютеров. Как правило, в параллельных версиях расчетная область разделяется на части, то есть проводится декомпозиция области. Затем построенные области распределяются между доступными процессорами.

Среди наиболее популярных и широко используемых программных комплексов, применяемых для моделирования турбулентных течений в задачах аэрогидродинамики (CFD – Computer Fluid Dynamics), можно выделить:

- Программный комплекс ANSYS. Это мощная CAE-система, позволяющая решать мультифизические задачи. Благодаря наличию препроцессора, комплекс позволяет не только создавать геометрические модели встроенными средствами, но и импортировать готовые, созданные в CAD-системах. В настоящее время в программный комплекс ANSYS интегрированы такие мощные программные системы для моделирования турбулентности, как FLUENT и CFX.
- Программная система Star-CD. Это многоцелевой единый CFD-комплекс, предоставляющий пользователю возможность решения задач механики жидкости и газов на всех типах сеток: стационарные и нестационарные течения, ламинарные течения – модели ньютоновской и неньютоновской жидкостей, турбулентные течения (применяются несколько наиболее известных моделей), около- и сверхзвуковые течения, задачи теплопереноса, горения, многокомпонентные течения, многофазные потоки, задачи со свободными поверхностями и др.
- Программная система CFD-FASTRAN. Это мощный многоотраслевой инструмент для анализа летательных аппаратов. Комплекс объединяет гидродинамический модуль, модуль конечно-элементного расчета динамики твердого тела, а также обеспечивает их согласованное взаимодействие. Помимо этого, в CFD-FASTRAN имеется алгоритм сеточной интерполяции для подвижных сеток.

В качестве наглядного примера численного расчета турбулентных течений можно рассмотреть классическую задачу об эволюции вихря Тейлора–Грина. Эта задача представляет собой пример распада первоначального одиночного стационарного вихря с последующим образованием каскада все более мелких вихревых образований, которые постепенно затухают за счет присущих течению диссипативных процессов. Данная задача хорошо изучена теоретически для малых и больших чисел Рейнольдса, поэтому она используется в качестве теста для проверки адекватности численных алгоритмов моделирования турбулентности. Результаты решения задачи с использованием метода LES представлены на рис. 1 [2].

Еще одним примером расчета турбулентных течений является работа сотрудников Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, проведенная в 2006-2007 годах, посвященная исследованию течений в гидротурбинах. Полная проточная часть гидротурбины изображена на рис. 2а). Рассматривались как полномасштабный вариант расчета, то есть во всей проточной части, так и расчет по частям: спиральная камера, направляющий аппарат, сама турбина, а также так называемая отсасывающая труба. При тех вычислительных ресурсах, которые имелись на тот момент у разработчиков проекта (8- и 48-процессорные кластеры), можно было проводить достаточно ограниченные исследования достаточно сложной системы. Тем не менее, учитывая, что в проточной части имеется развитое турбулентное течение, проблема выбора тех или иных моделей турбулентности была весьма актуальной [3, 4]. На рис. 2б) показаны характерные мгновенные изоповерхности кинетической энергии турбулентности за гидротурбиной в области отсасывающей трубы. Заметим, что именно срывы вихрей, подобные приведенным на рис. 2б), служат одним из источников мощных пульсаций давления в проточной части турбины. В результате этой работы были проведены многовариантные расчеты течения в проточной части турбины. На момент её проведения

она была уникальной для России. При расчете течения рассматривались два базовых варианта такого ключевого параметра, как объёмный расход через турбину, – $368 \text{ м}^3/\text{с}$ и $319.2 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом проводились расчеты КПД системы. В таблице 2 приведены характерные параметры расчетов.

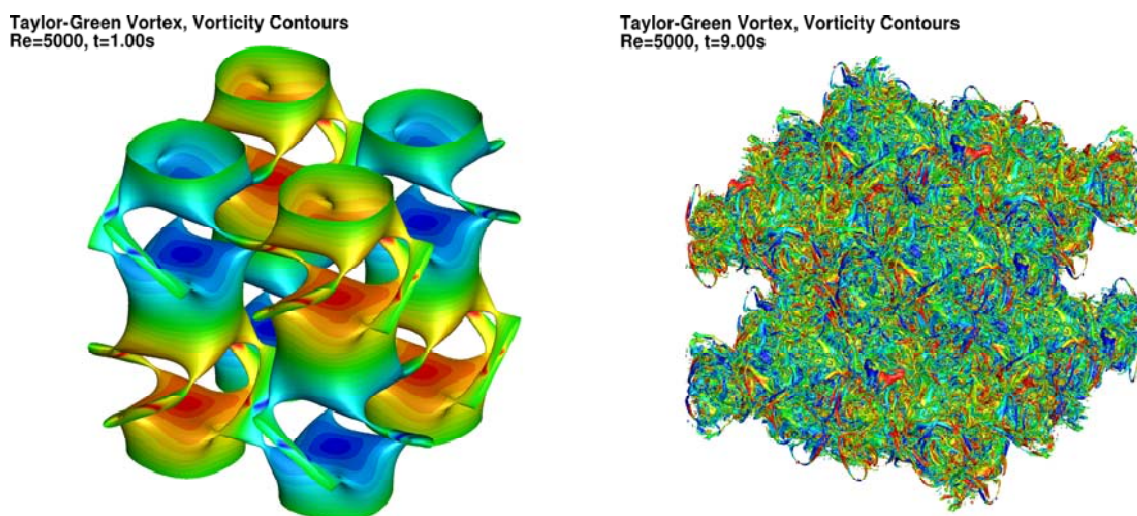


Рис. 1. Поверхности уровня завихренности поля скорости для моментов времени $t=1 \text{ с}$ (слева) и $t=9 \text{ с}$ (справа)

Отметим, что величина экспериментального значения КПД при объёмном расходе $330 \text{ м}^3/\text{с}$ равна 95.27% , что на рассматриваемом уровне моделирования хорошо согласуется с численными результатами. К сожалению, имевшиеся на тот момент времени вычислительные ресурсы не позволили решать задачу на более «мелких» сетках. Вместе с тем на сравнительно малых ресурсах удалось достаточно хорошо протестировать ряд наиболее употребительных моделей турбулентности в данной, крайне важной практической задаче. В расчетах использовались программные комплексы FLUENT и CFX.

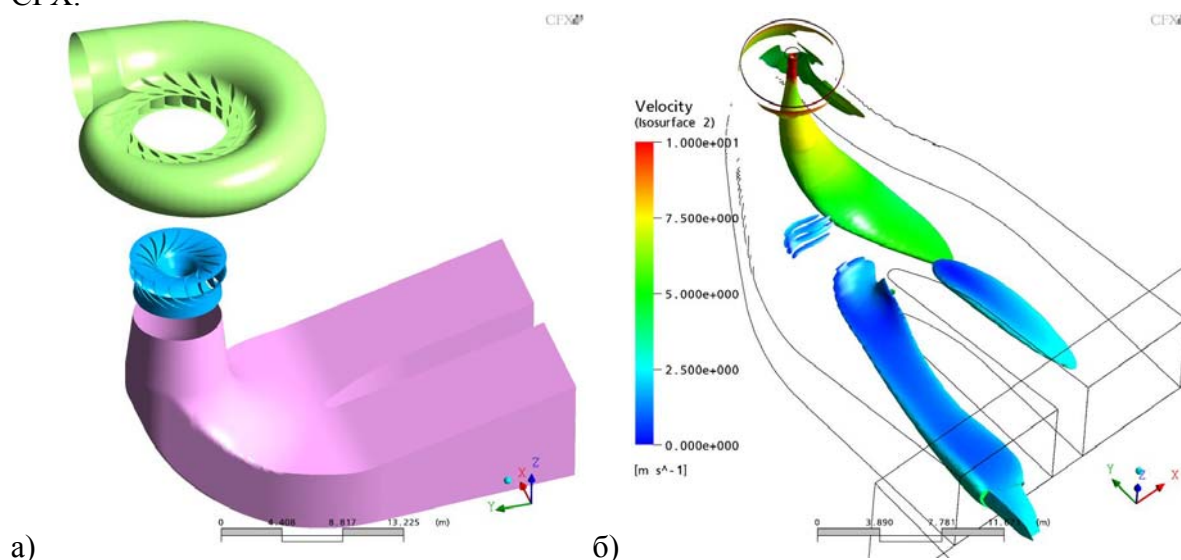


Рис. 2. Проточная часть (а), вихревая зона за турбиной (б)

В докладе приведен и ряд других задач моделирования турбулентности в разнообразных машинах и системах, при этом основным тезисом является то обстоятельство, что уровень адекватности моделирования физической реальности напрямую связан с доступными вычислительными мощностями.

Таблица 2

Общее число узлов расчётных сеток	Объёмный расход 368 м ³ /с		Объёмный расход 319.2 м ³ /с	
	КПД всей гидротурбины при расчёте по частям, %	КПД всей гидротурбины при расчёте проточного тракта в целом, %	КПД всей гидротурбины при расчёте по частям, %	КПД всей гидротурбины при расчёте проточного тракта в целом, %
2 547 010	83.46	85.41		86.18
5 624 563	90.65	93.37		93.73
38 099 030	94.98		95.46	

Литература

1. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Возможности и ограничения современных подходов к моделированию турбулентности в аэродинамических расчетах. Учебное пособие. СПбГПУ, 2012. С. 88.
2. High Performance Computing in Science and Engineering '11. Transactions of the High Performance Computing Center (Editors Wolfgang E. Nagel, Michael M. Resch, Dietmar V. Kröner). Stuttgart (HLRS), 2011. P. 649.
3. Болдырев Ю.Я., Викторов Е.Д., Шиндер Ю.К. и др. Отчет о НИР «Сравнительный анализ результатов расчета 3-мерного потока жидкости в типовых элементах гидромашин, основанный на применении пакетов гидродинамических программных комплексов Cadrin, Fluent и CFX». СПб.: СПбГПУ, 2005. 136 с.
4. Болдырев Ю.Я., Викторов Е.Д., Шиндер Ю.К. и др. Отчет о НИР «Разработка методических вопросов расчета потерь энергии в элементах проточной части гидротурбин с применением вычислительной гидродинамики». СПб.: СПбГПУ, 2007. 70 с.