

Суперкомпьютерные технологии: новая эра в моделировании турбулентности



6 Supercomputer Technologies: a New Era in Turbulence Simulation

In this article the effect of increasing computer power on current trends in numerical modeling is analyzed in general and in evolution of the turbulence simulation approaches, in particular. A set of examples is given, illustrating capabilities of the modern approaches to representation of turbulence in complex flows with the use of supercomputers.

Key words: supercomputers, turbulence, numerical modeling, numerical simulation

AUTHORS:

Prof. M.Kh. Strelets – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory “Computational Aeroacoustics and Turbulence”, Institute of Mathematic Modeling and Intelligent Control Systems of Joint Institute of Science and Technology, Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU)

e-mail: strelets@mail.rcom.ru

M.L. Shur – PhD, Associate Professor, Leading Research Scientist, Laboratory “Computational Aeroacoustics and Turbulence”, Institute of Mathematic Modeling and Intelligent Control Systems of Joint Institute of Science and Technology, Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU)

e-mail: mshur@cf.d.spbstu.ru

A.K. Travin – PhD, Senior Research Scientist, Laboratory “Computational Aeroacoustics and Turbulence”, Institute of Mathematic Modeling and Intelligent Control Systems of Joint Institute of Science and Technology, Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU)

e-mail: atravin@cf.d.spbstu.ru

A.V. Garabruk – PhD, Associate Professor, Department of Hydroaerodynamics, Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU)

e-mail: agarbaruk@cf.d.spbstu.ru

Суперкомпьютерные технологии: новая эра в моделировании турбулентности

6

В статье проанализировано влияние, оказываемое ростом производительности компьютеров на общие тенденции развития методов численного моделирования и в частности на эволюцию методов моделирования турбулентности. Приведен ряд примеров, иллюстрирующих возможности современных подходов к описанию турбулентности при расчете сложных турбулентных течений с использованием суперкомпьютерных технологий.

Ключевые слова: суперкомпьютеры, турбулентность, численное моделирование, имитационное моделирование

АВТОРЫ:

М.Х. Стрелец – д. ф.-м. н., проф., заведующий лабораторией «Вычислительная аэроакустика и турбулентность» Института математического моделирования и интеллектуальных систем управления Объединенного научно-технологического института СПбГПУ
e-mail: strelets@mail.rcom.ru

М.Л. Шур – к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Вычислительная аэроакустика и турбулентность» Института математического моделирования и интеллектуальных систем управления Объединенного научно-технологического института СПбГПУ
e-mail: mshur@cfд.spbstu.ru

А.К. Травин – к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории «Вычислительная аэроакустика и турбулентность» Института математического моделирования и интеллектуальных систем управления Объединенного научно-технологического института СПбГПУ
e-mail: atravin@cfд.spbstu.ru

А.В. Гарбарук – к. ф.-м. н., доцент кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ
e-mail: agarbaruk@cfд.spbstu.ru

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост числа фундаментальных и прикладных исследований, связанных с применением численного моделирования в самых различных областях науки и техники. При этом наблюдается отчетливая тенденция к переходу от эмпирических и полуэмпирических моделей к моделям, базирующимся на «первых принципах», что даже привело к появлению нового термина «имитационное численное моделирование» (“numerical *simulation*” в противоположность “numerical *modeling*” в англоязычной литературе). Как следствие, значительно повысился уровень доверия к результатам численного моделирования со стороны инженеров и конструкторов, непосредственно участвующих в создании новой техники.

Наиболее ярко указанная тенденция проявляется в вычислительной аэродинамике (Computational Fluid Dynamics — CFD), которая всегда служила и продолжает служить своеобразным локомотивом развития суперкомпьютеров и технологий высокопроизводительных вычислений. Это объясняется исключительной практической важностью CFD («потребителями» CFD являются авиация, ракетостроение, кораблестроение, энергомашиностроение, лазерная техника, химическая технология, экология, медицина) и огромными вычислительными ресурсами, необходимыми для решения с помощью CFD прикладных задач. Особое место в этом смысле занимает проблема расчета турбулентных течений. Несмотря на то, что на протяжении уже более 100 лет (начиная с классических работ О. Рейнольдса) она находится в центре внимания многих выдающихся механиков и математиков, удовлетворительного пути решения данной проблемы до сих пор не найдено. Специфика ситуации состоит в том, что в отличие от многих других сложных физических явлений, для описания которых строгие математические модели отсутствуют, турбулентные течения подчиняются классическим уравнениям Навье — Стокса, сформулированным еще в XIX веке. Соответствующий (непосредственно базирующийся на решении этих уравнений) подход к расчету турбулентных течений получил название прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation — DNS), а его «усеченная» версия, в которой точно разрешаются только относительно крупные вихревые структуры, названа методом моделирования крупных вихрей (Large-Eddy Simulation — LES). Однако, как видно из приведенной ниже таблицы, для применения DNS и LES требуются гигантские вычислительные ресурсы, которые даже по самым оптимистичным прогнозам роста быстродействия суперкомпьютеров (в 2 раза каждые 5 лет) станут доступными лишь в конце текущего века.

Таблица

Вычислительные ресурсы и перспективы практического применения различных подходов к моделированию турбулентных течений [1]*

Метод	Степень эмпиризма	Необходимое число узлов сетки	Необходимое число шагов по времени	Готовность
RANS	Высокая	10^7	10^3	1985
DES	Средняя	10^8	10^4	2000
LES	Низкая	$10^{11,5}$	$10^{6,7}$	2045
DNS	Отсутствует	10^{16}	$10^{7,7}$	2080

* Приведенные в таблице данные относятся к типичным прикладным задачам аэродинамики, например, к расчету обтекания самолета или автомобиля, а оценки сроков «готовности» соответствующих подходов предполагают использование для их реализации наиболее мощных компьютеров.

Представленные в таблице данные также наглядно иллюстрируют отмеченную выше общую тенденцию к снижению уровня эмпиризма. Так, пик в развитии полуэмпирических методов моделирования турбулентности, базирующихся на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса (RANS), был достигнут в конце прошлого века, и, как видно из таблицы, решение реальных задач с помощью этих методов требовало использования наиболее мощных компьютеров того времени. Дальнейшее развитие методов моделирования турбулентности связано с гибридными RANS – LES подходами, сочетающими в себе лучшие свойства RANS и LES методов. Первый гибридный подход – метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached-Eddy Simulation – DES), предложенный в 1997 году [2], уже через несколько лет был реализован в наиболее продвинутых коммерческих CFD-кодах общего назначения и стал доступен многочисленным пользователям этих кодов. Как и в случае RANS, примерно в это же время производительность суперкомпьютеров достигла уровня, необходимого для проведения с помощью DES расчетов реальных течений, что в свою очередь стимулировало дальнейшее развитие этого метода (см., например, [3], [4]). Наряду с этим, в последние годы значительно возросло число работ, в которых для расчета турбулентных течений используются методы LES и даже DNS. Хотя в настоящее время эти работы носят в основном методический характер (в них рассматриваются относительно простые течения), созданный в результате методический задел, несомненно, окажется востребован

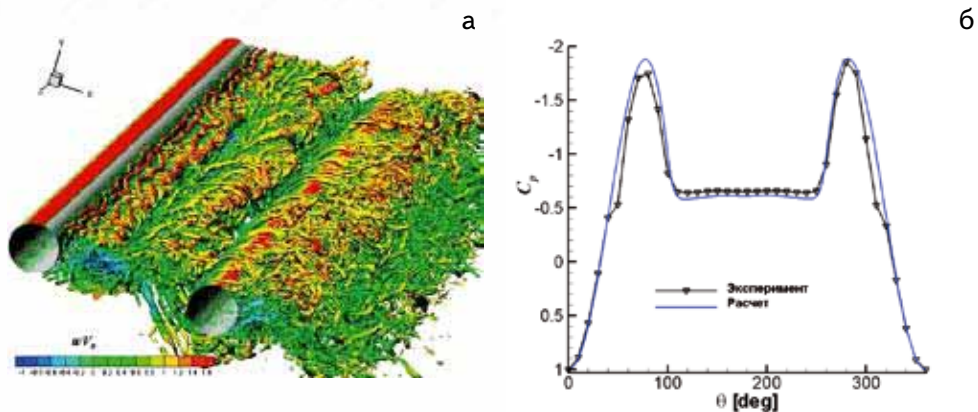


Рис. 1.

Структура турбулентности при обтекании тандема цилиндров (а) и сравнение результатов расчета распределения давления по поверхности переднего цилиндра тандема с экспериментом (б). Цветом показана величина продольной скорости потока

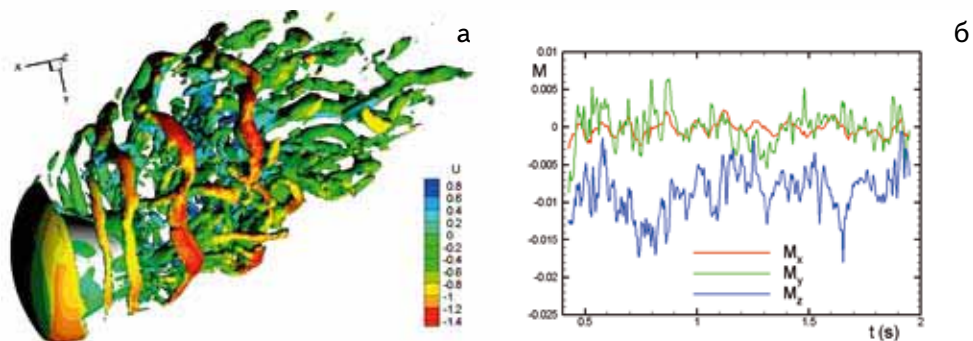


Рис. 2.

Структура турбулентности при обтекании возвращаемого космического модуля (а) и зависимость от времени действующих на него моментов аэродинамических сил (б)

ным, как только уровень развития суперкомпьютеров станет достаточным для реализации разработанных вычислительных технологий. Таким образом, если прогнозы таблицы окажутся справедливыми, то к концу нынешнего века фундаментальная проблема моделирования турбулентности, наконец, будет окончательно решена.

В заключение приведем несколько примеров расчетов с использованием DES и его модификаций, выполненных в лаборатории «Вычислительная аэро-

кустика и турбулентность» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и наглядно иллюстрирующих принципиально новые возможности, открываемые имитационным моделированием турбулентности.

Так, на рис. 1а представлена компьютерная визуализация турбулентных структур, формирующихся при обтекании тандема цилиндров, полученная с помощью метода [3]. Важно подчеркнуть, что эта визуализация мало чем отличается от аналогичных визуализаций, получаемых в современных дорогостоящих физических экспериментах, а осреднение по времени полученного нестационарного решения позволяет с высокой точностью предсказать измеряемые в экспериментах наиболее важные с практической точки зрения параметры потока, например, распределение давления по поверхности цилиндров, показанное на рис. 1б. Отметим, что соответствующий расчет был выполнен на сетке, содержащей примерно 60 миллионов узлов в режиме удаленного доступа на 8160 узлах суперкомпьютера

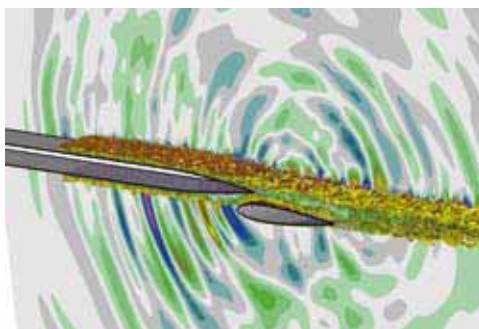
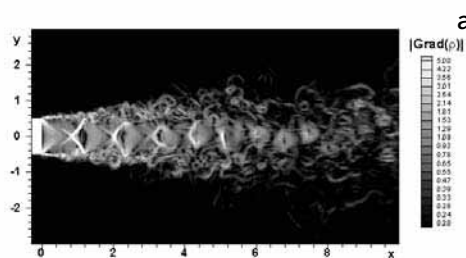


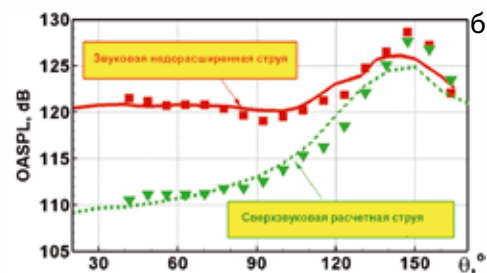
Рис. 3.
Структура турбулентности и картина звуковых волн при обтекании крыла с закрылком

“Intrepid” с Blue Gene/P-архитектурой, принадлежащего Argonne National Laboratory в США. Каждый из этих узлов построен на процессоре IBM PowerPC 450 (850 MHz) и имеет 2 Гб оперативной памяти. При этом затраты машинного времени оказались вполне разумными (около одиннадцати суток).

На рис. 2–4 показаны примеры, демонстрирующие возможности имитационного моделирования при решении ряда других важных задач



а



б

Рис. 4.
Мгновенное поле модуля градиента плотности в недорасширенной звуковой струе (а) и сравнение результатов расчета шума этой струи и аналогичной сверхзвуковой расчетной струи с экспериментальными данными (б)

аэродинамики и аэроакустики (соответствующие расчеты выполнены на вычислительных кластерах лаборатории вычислительной аэроакустики и турбулентности информационного комплекса СПбГПУ и Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН). В частности, на рис. 2 представлены результаты расчета трансзвукового обтекания возвращаемого космического модуля, рис. 3 иллюстрирует сложную структуру турбулентности и картину звуковых волн, излучаемых при обтекании крыла с закрылком, а рис. 4 показывает результаты расчетов аэродинамики и шума недорасширенной турбулентной звуковой струи.

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, выполнены при поддержке РФФИ (грант 12-08-00256а) и Европейской Комиссии (проект VALIANT, № ACP8-GA-2009-233680).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spalart P.R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P.R. Spalart // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2000. – V. 21. – P. 252–263.*
2. *Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach / P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras // Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES. – 1997.*
3. *A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities / P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.Kh. Strelets, A.K. Travin // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2006. – V. 20. – № 3. – P. 181–195.*
4. *A hybrid RANS – LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities / M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – V. 29. – P. 1638– 1649.*