

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ГАЗОДИНАМИКЕ

В.Д. Горячев, А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский

Численное решение задач вычислительной гидродинамики занимает все большее место в научных исследованиях. Оптимистические прогнозы, что вычислительный эксперимент в аэродинамике заменит натурный в аэродинамической трубе, начинают подтверждаться. Вычислительная производительность суперкомпьютеров за последние десять лет возросла на три порядка, в основном за счет увеличения числа процессоров в вычислительных системах и повышения их уровня интеграции. Освоены терафлопсные возможности, начато практическое использование петафлопсных компьютеров, будущее - освоение экзафлопсных систем. Однако, если ориентироваться на примеры подробного моделирования внешней аэродинамики авиационных аппаратов, видно, что реальные расчеты при больших углах атаки будут возможны только в будущем. Требуется использование вычислительных систем, на порядки более мощных по производительности.

Практика численных расчетов в гидро- газодинамике показывает, что подтверждаемые надежные результаты получены пока только на уровне использования гигафлопсной производительности компьютеров. Для продвижения на новые рубежи требуется совершенствование численных алгоритмов и устранение возникших узких мест в управлении обменными процессами при параллельных вычислениях и памятью ЭВМ. Требуется: быстрая (в динамике) генерация сеток для сложных геометрий для нестационарных течений, простая адаптация и оптимальное локальное разрешение сеток в области границ и в зонах больших изменений характеристик потоков, более простая реализация пространственных схем высокого порядка точности, максимальное упрощение алгоритмов для поддержки изменений в программном коде. Одним из важнейших является решение "bottleneck" - проблемы быстрой постобработки огромного потока данных в вычислительном процессе. В практическом смысле для создания быстрых кодов убедительной является тенденция использования блочных сеток, поиски методов оптимального разбиения расчетной области на подобласти для организации параллельной обработки. Возможно, что структурированные (частично) сетки вернут свои позиции в вычислительных кодах, так как это уменьшит число и размерность выходных данных. Тенденция к этому наблюдается в модификации известных расчетных CFD кодов, в частности отечественных: FlowVision [1], SuperNoisette 2D/3D, KSFD Poisson Solver [2,3], SINP [4].

Сложная вихревая структура пространственно разнообразных нестационарных течений на сетках большой размерности (в перспективе требуется обработка миллиардов контрольных объемов) требует адекватного инструментария для реального по времени визуального анализа течений и построения сцен значительного объема и информативности. Желательно вести эту работу на уровне прямого доступа к результатам вычислений по основным переменным, с минимальным временем получения этой информации, как в процессе счета, так и на выделенных временных слоях, с быстрой статистической обработкой первичных скалярных и векторных полей и сопутствующим дополнительным анализом течения. Эта задача принята к решению многими разработчиками вычислительных систем в CFD, основные программные средства имеются, но эффективные способы управления возникающими огромными объемами информации пока еще только планируются для реализации в кодах. Существующие графические постпроцессоры адаптируются к потенциальным возможностям анализа расчетов в системах петафлопсного уровня. Однако, решение проблем эффективного анализа расчетов находится пока на самом начальном уровне.

Примеры графического анализа расчетов течений, которые ожидается вести в будущем на более совершенных вычислительных системах, даются на примере обработки результатов моделирования сверхзвукового течения.

В задаче исследовалось развитие сверхзвукового течения над плоской пластиной с переходом от ламинарного режима к турбулентному [5,6]. Были выделены линейный и нелинейный этапы ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое этого сверхзвукового течения при числе Маха  $M=2$ . Для решения уравнений Навье-Стокса использовалась методика DNS для сжимаемого газа. Начальный этап ламинарно-турбулентного перехода начинался при росте возмущений, распространяющихся под углом 50-60 градусов к направлению основного движения газа. Эти результаты находятся в согласии с теорией LST. Нелинейный этап перехода ранее не был детально исследован. DNS - моделирование позволило рассчитать течение, в котором распространение возмущений ведет к быстро нарастающему образованию системы вихрей и режиму развитой турбулентности. В основном этот процесс связан с вторичной неустойчивостью сдвигового слоя, которая инициирует генерацию поперечных вихрей и нелинейную эволюцию трехмерных возмущений, с формированием продольных вихревых структур. Сложная динамика вихревых образований анализировалась с использованием изоповерхностей Q-критерия и выявления вихревых линий и линий тока в критических

областях зарождающихся вихревых зон.

Используемых контрольных объемов в расчетной области было порядка десяти миллионов. Вычисления велись на суперкомпьютере "МВС-100К" и кластере НГУ. Использовались 64 процессора. Эффективность распараллеливания была на уровне 85%. Общее время расчета составило порядка 500 часов процессорного времени.

Визуализация трехмерной структуры течения была выполнена с помощью специализированной графической системы HDVIS. Обработка рассчитанных полей осуществлялась на множестве первичных данных. На их основе строилась и корректировалась сцена визуализации: проводился выбор удобных видов, сечений и выделенных областей анализа, велось построение карт распределения векторных и скалярных полей, генерация изоповерхностей, отображение линий тока и вихревых линий, сочетаемое с анимацией этих объектов и т.п. В HDVIS возможна обработка полученной первичной информации с выполнением встроенных в систему операций по расчету вторичных полей (производных скалярных и векторных полей, тензорных величин), с их связыванием и выделением особенностей течения, идентификацией вихревых структур, например, на основе вычисления  $Q$ - или  $\lambda^2$ -критерия и т.п. Автоматизация визуальной обработки позволяла монтировать представительный набор изображений, создавать законченные иллюстрации и анимационные ролики, комфортно вести сравнительный графический анализ результатов.

Иллюстративная обработка велась по всем возможным в системе визуализации позициям. Ниже на рисунке 1. приведено распределение изоповерхностей  $Q$ -критерия, показывающее вихревую структуру моделируемого перехода ламинарного течения в турбулентный режим при формировании сверхзвукового потока газа над плоской пластиной. На втором рисунке вихревая структура представлена через распределение модуля градиента давления, построены шпирен-изоповерхности.

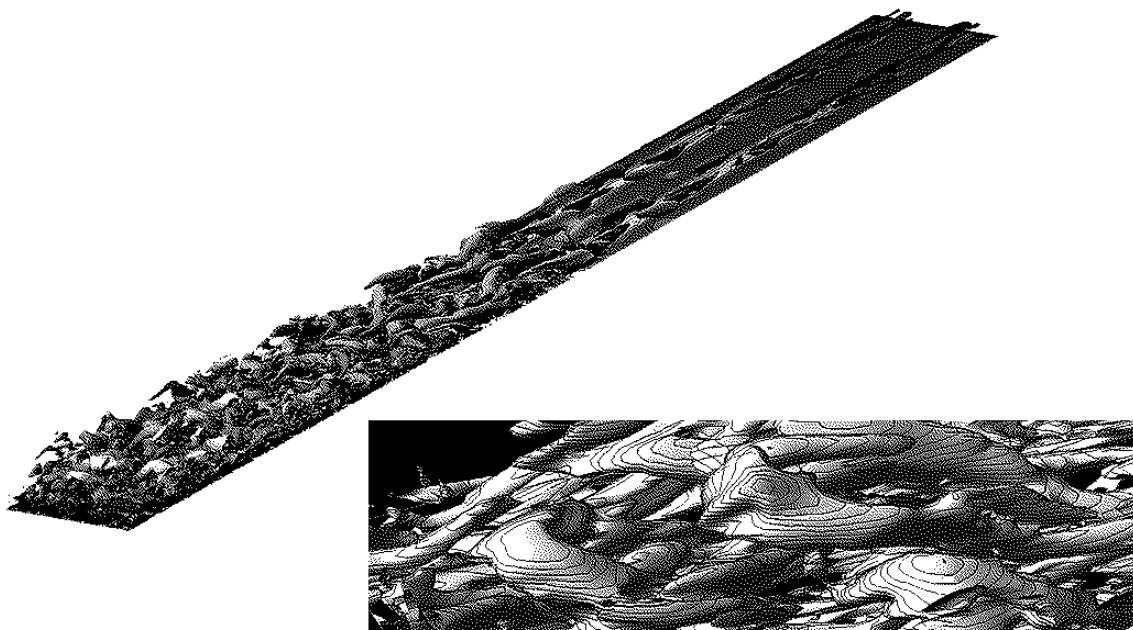


Рис. 1. Переход ламинарного течения в турбулентный режим.

Проведенный с использованием различных функций HDVIS визуальный анализ позволил детально исследовать структуру рассчитанного течения. Были определены формирующиеся при переходе турбулентные пятна, вытянутые в продольном направлении пальцеобразные вихри, известные из экспериментальных наблюдений "лямбда" и "омега" - образные вихри, подковообразные структуры, вихри, имеющие вид шпилек (hairpins). В процессе обработки полей выявлены структурные вихреобразования в форме "грибных шляпок", в расчетах подобного рода ранее не упоминаемые.

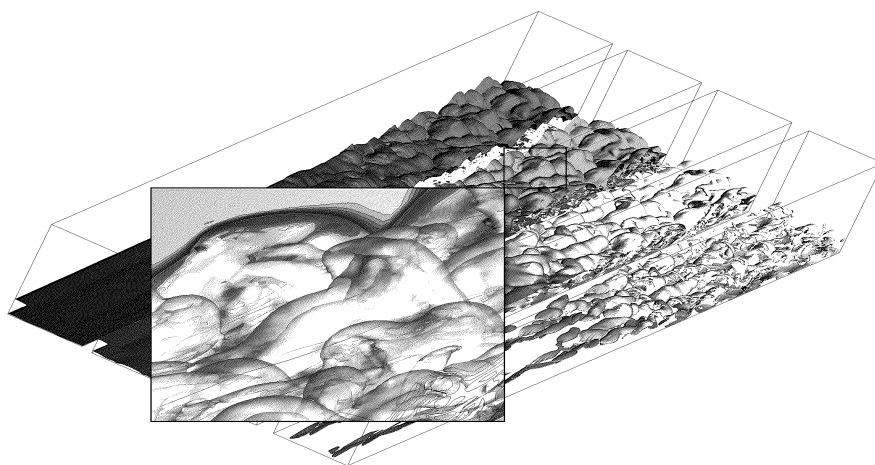


Рис. 2. Идентификация крупных турбулентных вихрей через выделение изоповерхностей модуля градиента плотности.

В целом трудоемкий расчет представленной задачи был достаточно хорошо дан в наглядной визуальной форме. Полученный опыт будет использован для повышения качества и скорости визуальной обработки при реализации больших задач газовой динамики на более мощных вычислительных системах.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по гранту № 11-07-00135.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. А.А. Дядькин, С.А. Харченко, Алгоритмы декомпозиции области и нумерации ячеек с учетом локальных адаптаций расчетной сетки при параллельном решении систем уравнений в пакете FlowVision. // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Internet: многоядерный компьютерный мир?», 201-206, 2007.
2. F. X. Trias, A.V. Gorobets, M. Soria and A. Oliva, // DNS of natural convection flows on MareNostrum supercomputer - In Parallel Computational Fluid Dynamics. Elsevier, 2007.
3. А.В.Горобец, Масштабируемый алгоритм для моделирования несжимаемых течений на параллельных системах. // Математическое моделирование, т. 19, № 11, 2007.
4. Smirnov E.M., Abramov A.G., Ivanov N.G., Smirnov P.E., Yakubov S.A. DNS and RANS/LES-computations of complex geometry flows using a parallel multiblock finite-volume code // In.: Parallel CFD: Advanced Numerical Methods Software and Applications, Elsevier, 2004. P. 219-226.
5. D. Khotyanovsky, A. Kudryavtsev, Direct numerical simulation of transitional supersonic boundary layer on a flat plate // Abstracts 15th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia, 1-6 November 2010 / Novosibirsk: Parallel, 2010. Part. I. p. 35. ISBN 978-5-98901-077-3.
6. D. Khotyanovsky, A. Kudryavtsev, V. Goryachev, Parallel DNS of Transition and Breakdown to Turbulence in a Supersonic Flow over the Flat Plate // 23rd Int. Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics - ParCFD2011, Barcelona, BSC (Barcelona Supercomputing Center), Book of Abstracts, 2011, p. 39-40.