

# Опыт решения задач аэродинамики на супервычислительной системе ТТИ ЮФУ



## 19 Опыт решения задач аэродинамики на супервычислительной системе ТТИ ЮФУ

В работе обсуждаются алгоритмические и системные аспекты параллельных вычислений в связи с моделированием прикладных задач аэродинамики, а также представлены результаты параллельных вычислений на супервычислительной системе ТТИ ЮФУ в связи с аэродинамическими расчетами конкретных компоновок летательных аппаратов, в том числе перспективного дальнемагистрального самолета.

### АВТОРЫ:

**А.И. Сухинов** – докт. физ.-мат. наук, профессор, руководитель ТТИ ЮФУ (Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге),

*e-mail: sukhinov@gmail.com*

**В.Ф. Тишкин** – докт. физ.-мат. наук, профессор, зам. директора по научной работе ИПМ им. Келдыша (Институт прикладной математики г. Москва),

*e-mail: v.f.tishkin@gmail.com*

**К.А. Иванов** – канд. физ.-мат. наук, доцент, ТТИ ЮФУ (Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге),

**Д.В. Лапин** – начальник отдела математического моделирования и вычислительного эксперимента центра коллективного пользования супервычислительными ресурсами ТТИ ЮФУ (Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге),

*e-mail: dmitri.lapin@gmail.com*

**А.Е. Чистяков** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики ТТИ ЮФУ (Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге),

*e-mail: cheese\_05@mail.ru*

## Основные характеристики вычислительной системы

Супервычислительный комплекс ТТИ (СВК ТТИ) предназначен для численного моделирования вычислительно-трудоемких задач, требующих значительных (терабайтных) объемов оперативной памяти и производительностей, позволяющих решать важные прогнозные задачи, такие как предсказание сгонно-нагонных и заморных явлений в Азовском море, распространение загрязнений в водной и воздушных средах в регионах расположения крупных городов и др., в высокооперативном режиме. Эта система применяется также для численного решения прикладных задач аэро-гидродинамики летательных аппаратов, моделирования процессов распространения и рассеяния электромагнитных волн в связи с проектированием и оптимизацией антенных приемных и передающих систем, нанотехнологий и т.д. Другая важная задача этой системы – обучение методам численного моделирования и параллельного программирования на системах с массовым параллелизмом будущих инженеров-разработчиков современной техники и технологий, а также математиков-прикладников. В составе программного обеспечения, функционирующего на СВК ТТИ, имеются хорошо зарекомендовавшие себя программные комплексы решения задач, в том числе разработанные в ТТИ ЮФУ:

- **Ifremer MARS 3d** – программный пакет предназначен для решения трудоемких задач динамики жидкости со свободной поверхностью, а именно океанов, морей, лагун, регионов, шельфов и пляжей с учетом метеорологических условий, а также для различных источников. MARS 3D позволяет исследовать широкий спектр задач морской гидродинамики: расчет полей скоростей, транспорт тепла и солей, перенос биологических и химических веществ, фито- и зоопланктона, пассивную и активную седиментацию.
- **NumExp Fluid Numerical Instruments (FNI)** – программный комплекс, позволяющий решать задачи внешней и внутренней аэрогидродинамики, турбомашиностроения, атмосферной аэродинамики, экологии.
- **ANSYS Fluent** – программный комплекс, позволяющий проводить анализ широкого спектра промышленных задач динамики жидкости и газа (многофазных, реагирующих) потоков с учетом теплообмена (кондуктивного, конвективного и радиационного).
- **Azov3D** – программный пакет предназначен для решения трудоемких задач динамики жидкости со свободной поверхностью, с учетом специфики мелководных водоемов.



#### • EM Software & Systems FEKO

— программный комплекс позволяет выполнять моделирование сложных электромагнитных систем с применением современных параллельных технологий. Пакет поддерживает вычисления на системах, снабженных графическими ускорителями, системах с общей или распределенной памятью, а также на гибридных вычислительных системах.

• **Applied Biosystems SOLiD System BioScope** — программный комплекс применяется для решения прикладных задач в области исследования структур и связей фрагментов ДНК.

Кроме программных пакетов, для решения прикладных задач пользователям кластера доступны современные инструменты для исследований и разработки, такие как MATLAB, компиляторы, инструменты и библиотеки Intel и AMD для разработки эффективных параллельных программ.

Пиковая производительность МВС составляет 18,8 Tflops. МВС включает в себя 8 компьютерных стоек (рис. 1).



Рис. 1.  
Многопроцессорная вычислительная система

### Вычислительное поле

Вычислительное поле многопроцессорной вычислительной системы (МВС) ТТИ ЮФУ построено на базе инфраструктуры HP BladeSystem c-class с интегрированными коммуникационными модулями, системами электропитания и охлаждения. В качестве вычислительных узлов используется 128 однотипных 16-ядерных серверов-лезвий HP ProLiant BL685c, каждый из которых оснащен четырьмя 4-ядерными процессорами AMD Opteron 8356 2.3GHz и оперативной памятью в объеме 32 Гб.

Общее количество вычислительных ядер в комплексе — 2048, суммарный объем оперативной памяти — 4 Тб. Для управления МВС используется 3 управляющих сервера HP ProLiant DL385G5. Для задач резервного копирования используется библиотека MSL4048. В статье мы рассматриваем две важные проблемы из перечисленных выше — как опыт успешного решения вычислительно-трудных задач на СВК.

### Задачи прикладной гидро-аэродинамики

Одним из программных комплексов, входящих в состав программного обеспечения СВК ТТИ ЮФУ, является расчетный комплекс Fluid Numerical Instruments.

Данный комплекс базируется на разработках, апробированных в течение 15 лет в аэрокосмической отрасли, и используется при решении задач аэродинамического проектирования и турбомашиностроения. В перспективе комплекс позволит рассчитывать турбулентные сжимаемые поля течений с сопутствующими процессами (акустические, горение, хим. процессы, распространение примесей) вокруг произвольной геометрии и решать следующие инженерные и научные задачи:

- внешней и внутренней аэрогидродинамики;
- турбомашиностроения;
- исследования струй и вихревых следов за самолетами (проблема безопасности эксплуатации гражданской авиации в условиях перегрузки аэропортов);
- турбулентности и механики жидкости и газа;
- атмосферной аэродинамики;
- экологии;
- нелинейной гидроакустики.

В состав специализированного расчетно-программного комплекса входят:

- сеточный генератор;
- решатель;
- постпроцессор.

**Сеточный генератор FIMesh** базируется на топологии типа Overset Grid.

Методика построения расчетной сетки заключается в том, что для каждого геометрического элемента исследуемой модели строится блок структурированной сетки типа O-grid из гексаэдров. В результате образуется система перекрывающихся сеток, в области пересечения которых решения «сшиваются» с помощью специального алгоритма интерполяции, заложенного в решатель. При построении блока сетки пользователь задает граничные условия и пространственные градиенты изменения плотности для генерации расчетной сетки.

Основным преимуществом этой методики является сочетание регулярности (структурированности) сетки в интересующих областях (пограничный слой, зона отрыва пограничного слоя, область распространения вихря), что обеспечивает (сохраняет) высокий порядок аппроксимации и, соответственно, высо-

кую точность расчета и малую трудоемкость при построении расчетной сетки для всей области течения. При этом соотношение двух любых ребер гексаэдра может быть произвольным, ограничение вносят только схемы дискретизации, заложенные в решатель (соотношение 1:10000).

Входной формат данных для сеточного генератора – STL. Данные из сеточного генератора в решатель будут передаваться в собственном формате и формате Tecplot. Данные из решателя в постпроцессор будут передаваться в формате Ensight Gold и CGNS.

### Решатель. Главные уравнения

- уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу;
- уравнение переноса в общем виде (уравнение конвекции-диффузии);
- модели турбулентности Spalart-Allmaras, k-epsilon (однопараметрические и двухпараметрические дифференциальные уравнения).

При моделировании течения в пограничном слое обеспечивается как прямое разрешение ламинарного подслоя, так и применение пристеночных функций с учетом градиента давления.

Обеспечивается решение задач как в стационарной, так и в нестационарной постановке, при этом численное интегрирование главных уравнений по времени выполняется с 1 или 2 порядком точности.

В основе решателя лежит численный метод, базирующийся на полностью неявной схеме 2 и 3 порядка точности аппроксимации. Данная схема основана на интегральных законах сохранения для элементарной расчетной ячейки, записанных в декартовой системе координат, включая случай перехода во вращающуюся относительно одной из основных осей систему координат (X-ось). Конвективные члены рассчитываются на основе точного решения задачи о распаде произвольного разрыва или ее акустического аналога (затраты на вычисление которого более чем в два раза меньше) с предварительной реконструкцией начальных данных для обеспечения 2 и 3 порядка аппроксимации. Диффузионные члены рассчитываются на основе центральных разностей не ниже второго порядка. Полученная разностная схема обладает низкой сеточной диссипацией (ошибкой аппроксимации) при минимальных требованиях по адаптации разностной сетки к особенностям решаемой задачи.

Решение системы уравнений осуществляется с помощью итерационного метода, который может быть охарактеризован как метод Ньютона для решения нелинейного уравнения.

Типичный объем требуемой оперативной памяти на нестационарную задачу размером 10 000 000 ячеек составляет от 2 до 3 Гб.

**Постпроцессор** является отдельным приложением, необходимым для быстрого просмотра результатов в процессе расчета. Постпроцессор позволяет:

- визуализировать распределения переменных по поверхности модели в произвольных плоскостях в виде градиентных заливок;
- строить графики распределения переменной по поверхности модели и в пространстве.

Сразу же после ввода в эксплуатацию вычислительного кластера инициированы тестовые работы. Для верификации комплекса были проведены следующие расчеты:

- расчет обтекания крыла ONERA M6 трансзвуковым потоком;
- расчет трансзвукового течения в сверхзвуковом сопле;
- расчет поля течения в расходомерном сопле;
- расчет обтекания компоновки DLR-F8.

Результаты данных расчетов сравниваются с экспериментальными данными и результатами расчетов, полученными в пакетах Fluent и Wind-US.

В части прикладных исследований проведены расчеты полей течения вокруг компоновки перспективного пассажирского самолета на крейсерском режиме с моделированием работы двухконтурного турбореактивного двигателя. Данная работа выполнена в интересах ЗАО «Гражданские Самолеты Сухого».

Расчет поля течения газа сводился к решению полной трехмерной системы уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу [3], совместно с моделью турбулентности А.Н. Секундова  $v_{t90}$ . [4]



Рис. 2. Поверхностные элементы пространственной расчетной сетки. Вид на центроплан снизу

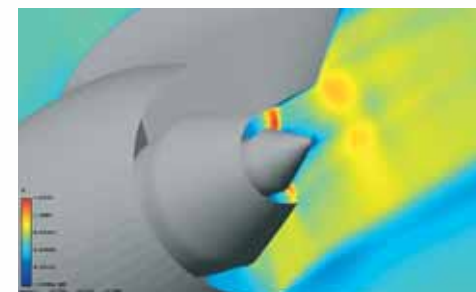


Рис. 3. Срез поля чисел Маха, проходящий через ось двигателя параллельно плоскости симметрии самолета



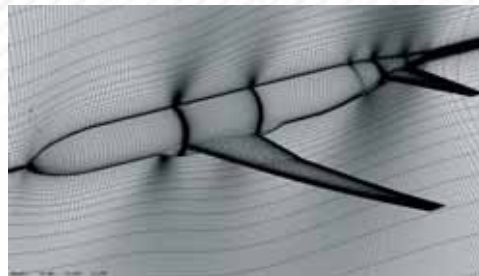


Рис. 4. Общий вид поверхностных элементов пространственной расчетной сетки из гексаэдров. Размерность сетки – 5 млн расчетных элементов

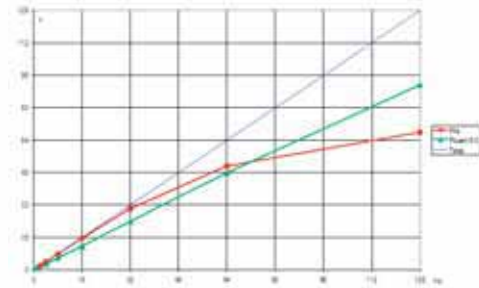


Рис. 5. График зависимости ускорения расчета от числа процессоров



Рис. 6. Распределение коэффициента давления по поверхности модели. Вид сверху

Схема дискретизации главных уравнений – неявная схема, основанная на решении задачи о распаде разрыва [5]. Метод решения нелинейных уравнений базировался на методе Ньютона.

Для дискретизации расчетной области используется блочно-структурированная сетка. Закон изменения толщин слоев гексаэдров по нормали от поверхности логарифмический, что соответствует характеру изменения характеристик пограничного слоя в нормальном направлении. Безразмерный параметр  $Y^+$  изменяется в диапазоне от 0,2 до 2.

Среда представляет собой сжимаемый, вязкий идеальный газ. В качестве зависимости, связывающей плотность с давлением и температурой, используется уравнение идеального газа.

Размерность расчетной сетки – около 30 млн расчетных элементов (гексаэдров). Число блоков сетки – около 400.

Анализируя результаты расчетных исследований, проведенных для ЗАО ГСС, выявлены неблагоприятные характеристики течения в зоне интерференции соплового аппарата двигателя и нижней поверхности кормовой части пилона двигателя, которые вызывают возникновение существенных волновых кризисов течения на пилоне.

**Оценка эффективности масштабирования параллельных рас-**

**четов на кластере** выполнена путем проведения серии параллельных расчетов обтекания компоновки DLR-F8 на числе процессоров от 2 до 128 с двукратным шагом.

Число М	Число Re	Угол атаки, (град.)
0,85	5,0E+06	0

Для сравнения с пакетом Fluent были использованы результаты аналогичных расчетов ([http://www.fluent.com/software/fluent/fl5bench/flbench\\_6.3/problems/fl512.htm](http://www.fluent.com/software/fluent/fl5bench/flbench_6.3/problems/fl512.htm)).

В результате серии расчетов, направленных на оценку сходимости, выявлены высокие характеристики алгоритмов до 64 процессоров. Однако при переходе к числу процессоров 128 происходит завал кривой масштабируемости, более существенный, чем у пакета Fluent. Это объясняется малым количеством расчетных узлов, приходящихся на один процесс и большими относительными накладными расходами на пересылку MPI пакетов. Данная проблема, связанная со структурой хранения данных, будет устранена разработчиками в ближайшее время.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulent Model for Aerodynamic flows. AIAA-92-0439, 1992.
2. Venkatakrishnan V., Allmaras S.R., Kamenetskij D.S., Johnson F.T. Higher order schemes for the compressible Navier-Stokes equations // AIAA-3987, 2003.
3. Годунов С.К. Разностный метод для расчета ударной волны. Достижения в области математических наук. – 1957. – 12. – № 1 (73). – С. 176–177.
4. Roe P.L. Approximate Riemann problem solvers, parameter vectors, and difference schemes // J. Comput. Physics. – 1981. – v. 43. – № 2. – Pp. 357–372.
5. Anderson W.K., Rausch R.D., Bonhaus D.L. Implicit Multigrid Algorithms for Incompressible Turbulent Flows on Unstructured Grids, 1996.