

# 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.

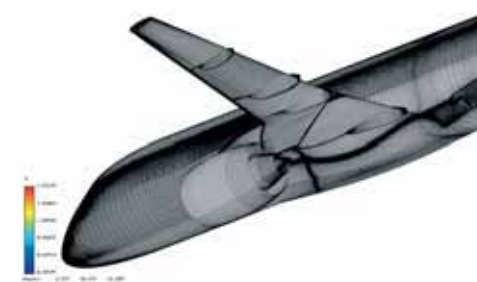


Рис. 2. Поверхностные элементы пространственной расчетной сетки. Вид на центроплан снизу

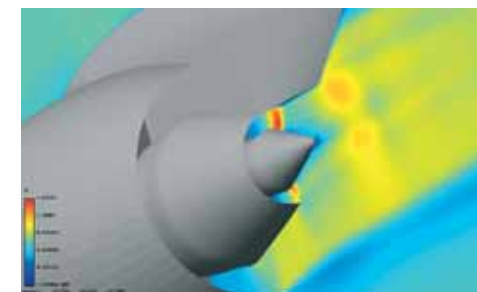


Рис. 3. Срез поля чисел Маха, проходящий через ось двигателя параллельно плоскости симметрии самолета

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]



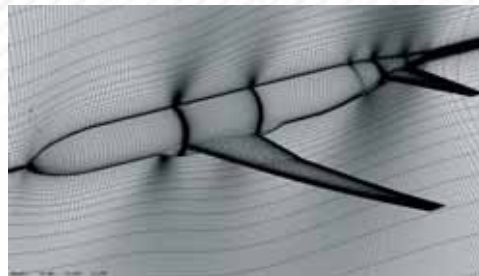


Рис. 4. Общий вид поверхностных элементов пространственной расчетной сетки из гексаэдров. Размерность сетки – 5 млн расчетных элементов

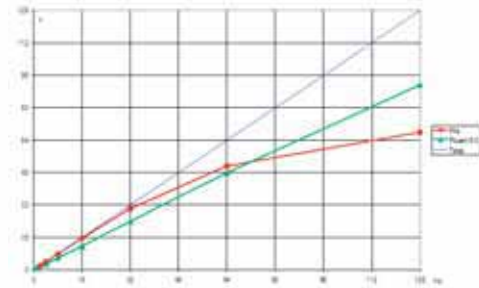


Рис. 5. График зависимости ускорения расчета от числа процессоров



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.