

Министерство образования и науки Российской Федерации
Российский фонд фундаментальных исследований
Южный научный центр Российской академии наук
Южный федеральный университет
НИИ многопроцессорных вычислительных систем
имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета
АО «НИЦЭВТ»
ФГУП «НИИ «Квант»
ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»
Журнал «Вестник компьютерных и информационных технологий»
Журнал «Известия ЮФУ. Технические науки»

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СКТ-2016

**Материалы 4-й Всероссийской
научно-технической конференции**

**19 – 24 сентября 2016 г.
Дивноморское, Геленджик**

ТОМ 2

Ростов-на-Дону
Издательство Южного федерального университета
2016

УДК004.272.43

ББК32.973

С 73

С 73 **Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2016)** (19–24 сентября 2016 г.) Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции : в 2 т. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2016. – 304 с.
ISBN 978-5-9275-2038-1
ISBN 978-5-9275-2040-4 (Т. 2)

Во втором томе материалов 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2016) представлены доклады по направлениям: распределенные вычисления и системы, облачные вычисления, применение суперкомпьютерных технологий в науке, технике и промышленности.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-07-20640 г.

М $\frac{2404000000}{6КО(03) - 2016}$ без объявл.

ББК 32.973

ISBN 978-5-9275-2040-4 (Т. 2)
ISBN 978-5-9275-2038-1

УДК 004.272.43
ББК 32.973

© Авторы докладов, 2016
© Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», составление, оформление, 2016

РАЗДЕЛ 5. ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

<i>Блайвас М.Г., Дмитриев А.В., Дмитриев И.Н., Ярцев И.М.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕР ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	209
<i>Веркеенко М.С., Горбачев В.А.</i> ПЛОТНОЕ МНОГОВИДОВОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПОТОЧНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ	213
<i>Витиска Н.И., Гуляев Н.А.</i> ПРОБЛЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ОБЪЁМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ	218
<i>Григорьев Ф.В., Сулимов А.В., Кочиков И.В., Кондакова О.А., Сулимов В.Б., Тихонов А.В.</i> СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК	223
<i>Дворкович В.П., Дворкович А.В.</i> ОБРАБОТКА АУДИОВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОВЫШЕНИЕ РЕАЛИСТИЧНОСТИ ВОСПРИЯТИЯ	227
<i>Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	232
<i>Дорошенко В.Ю., Сухарева Д.Б., Зоцик Н.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	236
<i>Дудкин А.А., Марушко Е.Е.</i> АНСАМБЛЬ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	240

**ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ***

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва,
dimit@bmstu.ru*

Введение

В докладе предложен алгоритм численного моделирования сопряженных аэрогазодинамических и термомеханических процессов в композитных конструкциях высокоскоростных летательных аппаратов, который позволяет рассчитывать все параметры трехмерного аэрогазодинамического потока в окрестности поверхности аппарата, теплообмен на поверхности, процессы внутреннего теплопереноса в конструкции из термодеструктирующего полимерного композитного материала, а также динамические процессы термомеханического деформирования композитной конструкции, включающие в себя эффекты изменения упругих характеристик композита, переменную тепловую деформацию, усадку, вызванную термодеструкцией, образование внутривещного давления газов в композите. Разработан автоматизированный программный комплекс SIGMA, реализующий полученные алгоритмы и способный проводить вычисления на высокопроизводительных компьютерах. Приведен пример численного моделирования сопряженных процессов в модельной композитной конструкции высокоскоростного летательного аппарата, иллюстрирующий возможности предложенного алгоритма. Показано, что вследствие высоких температур аэродинамического нагрева конструкций из полимерных композиционных материалов, в них может происходить терморазрушение из-за термодеструкции полимерной фазы и интенсивного внутреннего газообразования в материалах конструкции.

Общая система уравнений сопряженной задачи гиперзвуковой аэротермодинамики и термомеханики

Общая постановка сопряженной задачи аэротермодинамики и термомеханики состоит из 3-х систем уравнений:

* Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-3007.2015.8. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова [4]

- уравнений Навье-Стокса внешнего газового потока, обтекающего конструкцию;
- уравнений внутреннего теплопереноса в конструкции;
- уравнений термоупругости оболочечной конструкции.

Разработка метода решения сопряженной задачи

Для численного решения сопряжённой задачи используется пошаговый метод с двумя шагами по времени Δt_1 и Δt_2 . Максимальный крупный шаг Δt_1 по времени используется для изменения граничных условий задачи – входных данных набегающего потока и решения задачи внутреннего теплопереноса. На каждом шаге Δt_1 решение осуществляется в четыре этапа.

Этап 1. Решение системы уравнений внутреннего теплопереноса (4) – (12). Это решение осуществляется численным конечно-разностным методом с использованием метода линеаризации и неявной разностной схемы. Температура поверхности конструкции, взаимодействующей с набегающим газовым потоком, на этом этапе полагается известной и берется с предыдущего временного шага Δt_1 .

Этап 2. Осуществляется цикл решения системы уравнений Навье-Стокса (1) – (3) с мелким шагом Δt_2 до установления потока. Тепловой поток на твёрдой стенке полагается фиксированным. Для решения систем дифференциальных уравнений Навье-Стокса используется метод конечных объемов на основе элементов, центрированных относительно узлов сетки (vertex-centered volume).

Этап 3. Осуществляется решение системы уравнений термоупругости оболочечной конструкции аппарата с помощью метода конечного элемента. Входными данными для этой задачи являются поля давлений на внешней и внутренней поверхности оболочки, которые определяются после решения уравнений газовой динамики, а также распределение температуры, объёмных концентраций фаз и порового давления газообразных продуктов терморазложения композитной оболочки, которые рассчитываются при решении уравнений внутреннего теплопереноса.

Этап 4. После решения задачи термоупругости осуществляется расчёт термонапряжений в оболочке.

Описание разработанного программного комплекса

Разработанные алгоритмы вошли в состав программно-вычислительного комплекса SIGMA [1-2], который применяется для моделирования совместных процессов сверхзвуковой и гиперзвуковой газовой динамики и теплопереноса в областях сложной криволинейной формы. Программный комплекс включает в себя модули: трёх-

мерного геометрического моделирования, позволяющего генерировать достаточно широкий диапазон трёхмерных геометрических областей, модуль задания свойств, параметров и начальных данных, генератор адаптивной сетки (препроцессор), расчётный модуль (процессор) и визуализатор расчётов (постпроцессор). Каждый модуль является независимым программным продуктом, написанным на языке C++, и поддерживает возможность создания расширений. Большинство итерационных процедур генерации сеток и расчётного модуля обладают геометрическим параллелизмом и реализованы с использованием коммуникационных библиотек OpenMP 2.0 и MPI.

Для генерации сеток используется собственный генератор геометрически-адаптивных структурированных сеток [3]. Имеются функции, позволяющие управлять сгущением узлов сетки вблизи граничных поверхностей блоков. Вокруг сгенерированных узлов сетки строятся центрированные контрольные объёмы, ребра которых сохраняют адаптацию сеточных линий под границы области и позволяют получать более качественные картины течения, чем на сетках, в которых ребра элементов ориентированы произвольным образом.

Проводилось тестирование программного комплекса на различных тестовых задачах путём сравнения с известными аналитическими и численными решениями [3]. Установлено, что в среднем погрешность решения не превышает 2 %, на большинстве задач удаётся достигнуть сеточной сходимости результатов.

Результаты численного решения

В работе представлены результаты численного моделирования обтекания фрагмента корпуса модельного летательного аппарата эллипсоидальной формы гиперзвуковым потоком газа ($M = 6$) на высоте 15 км.

Полученное численное решение с хорошим разрешением передаёт головной скачок уплотнения в критической точке летательного аппарата, максимум плотности, давления и температуры приходится на критическую точку носка аппарата, в которой температура достигает 2 000 К.

Представлены результаты численных расчетов полей внутренне-го тепломассопереноса в оболочке элемента ГЛА. Терморазложение полимерной фазы композитной оболочки приводит к образованию большого количества газообразных продуктов в порах материала. Ввиду низкой газопроницаемости композита образующиеся газы не успевают отфильтровываться во внешний газовый поток и создают внутреннее поровое давление.

На рис. 1 показана эффективность распараллеливания с помощью MPI на суперкомпьютере МГУ "Чебышев" решения одной из задач газовой динамики на конечно – разностной сетке с 16 млн узлов. Было просчитано 5 000 временных слоев. Эффективность, близкая к линейной, сохраняется до 256 ядер, далее она начинает снижаться.

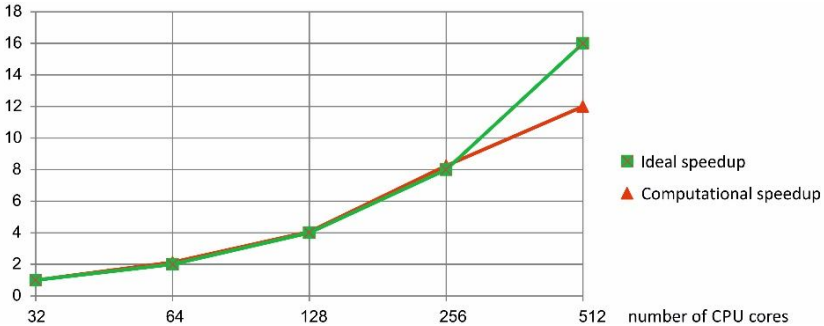


Рис. 1. Эффективность распараллеливания задачи расчета газодинамических параметров. По оси абсцисс – количество задействованных ядер, по оси ординат – ускорение

1. *Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А.* Разработка математического и программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования сопряженных процессов гиперзвуковой аэродинамики и термомеханики композитных конструкций перспективных летательных аппаратов // *Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции "Суперкомпьютерные технологии" (СКТ-2014)*. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. – 2014. – С. 118-121.
2. *Димитриенко Ю. И., Коряков М. Н., Захаров А. А.* Разработка программного комплекса SIGMA для суперкомпьютерного моделирования сопряжённых аэродинамических и термомеханических процессов в композитных конструкциях высокоскоростных летательных аппаратов // *Суперкомпьютерные дни в России*. – М., 2015. – С. 399-410.
3. *Димитриенко Ю. И., Котенев В. П., Захаров А. А.* Метод ленточных адаптивных сеток для численного моделирования в газовой динамике. – М.: Физматлит. – 2011. – 280 с.
4. *Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В.* Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // *Открытые системы*. – М.: Издательский дом "Открытые системы". – 2012. – № 7. – С. 36-39.

Научное издание

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СКТ-2016

**Материалы 4-й Всероссийской
научно-технической конференции**

19 – 24 сентября 2016 г.
Дивноморское, Геленджик

ТОМ 2

Компьютерная верстка Иванова Н.Ю.
Редакторы: Кочергина Т.Ф., Проценко И.А., Селезнева Н.И.
Корректоры: Надточий З.И., Чиканенко Л.В.

Подписано в печать 29.07.2016.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 17,67. Уч.-изд. л. 15,6.
Тираж 120 экз. Заказ № 5264.

Издательство Южного федерального университета.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 247-80-51.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 247-80-51.