



Рис. 4.  
Международная молодежная летняя школа  
"Суперкомпьютерное моделирование"

мероприятиях для информирования общества и представления достижений в развитии СКТ.

Логика распределения целевых усилий по выполнению как первой части проекта в 2010 году, так и второй в 2011–2012 годах, определяется тем, что в проект изначально заложены две одинаково важные составляющие. Первая — это подготовка 500 специалистов по СКТ за 2010–2012 годы, вторая — создание системы подготовки высококвали-

фицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения. Первая составляющая направлена на решение текущих неотложных нужд страны в специалистах данного профиля. Вторая составляющая закладывает основу динамичного развития в будущем, обеспечивая воспроизводство высококвалифицированных специалистов в рамках системы высшего профессионального образования РФ после завершения проекта в целом в 2012 году.

Исполнители проекта — Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И.Лобачевского, национальный исследовательский Томский государственный университет, национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, члены Суперкомпьютерного консорциума университетов России.

Все задачи, показатели и индикаторы, поставленные перед исполнителями проекта в 2010 году, полностью выполнены.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интернет-центр системы образовательных ресурсов в области СКТ <http://hpc-education.ru/>.
2. Интернет-университет суперкомпьютерных технологий <http://hpcu.ru>.

# Моделирование задач аэроакустики на суперкомпьютере «Ломоносов»



## 2 Моделирование задач аэроакустики на суперкомпьютере «Ломоносов»

Аэроакустические расчеты являются актуальной и сложной задачей с высокой вычислительной стоимостью. В статье представлен алгоритм, основанный на схемах повышенной точности для неструктурированных сеток, который позволяет задействовать десятки тысяч процессорных ядер суперкомпьютера, и вычислительный эксперимент фундаментального характера, в котором воспроизводятся механизмы генерации шума от обтекания стоек шасси самолета.

Задачи вычислительной газовой динамики, направленные на изучение механизмов генерации шума, приобретают в настоящее время все большую актуальность. Это связано, в частности, с возрастающими требованиями к уровню шума самолетов. Исследования сосредоточены на нескольких направлениях, соответствующих основным источникам шума: шум от реактивной струи, шум от вентилятора газотурбинного двигателя и аэродинамический шум от обтекания планера.

Задачи по снижению шума от струи, в частности, связаны с оптимизацией формы сопла и поиском альтернативных механизмов влияния на шум, таких, как впрыск микроструй, электрические разряды и так далее. Задачи по снижению шума от вентилятора связаны с оптимизацией звукопоглощающих конструкций (ЗПК), специальных панелей, расположенных в различных частях мотогондолы и двигателя. Задачи по аэродинамическому шуму направлены в основном на снижение шума от обтекания шасси и механизации крыла.

Аэроакустические задачи, как правило, представляют собой сложный газодинамический расчет, дополненный специальными моделями для расчета акустических возмущений в дальнем поле течения. Данные задачи имеют несколько особенностей, обуславливающих высокую вычислительную стоимость. Во-первых, это необходимость использования численных схем повышенного порядка точности, чтобы корректно воспроизводить и турбулентное течение, и акустические волны, имеющие очень небольшую амплитуду по сравнению с турбулентными пульсациями. Во-вторых, необходимость высокого разрешения по пространству, особенно в области ближнего поля, где происходят процессы генерации шума. В-третьих, необходимость высокого разрешения по времени для получения широкополосных спектров, в сочетании с необходимостью в длительном интервале интегрирования по времени для получения качественного осреднения.

Базовые численные алгоритмы, реализованные в исследовательском комплексе программ NOISEtte, включают в себя класс моделей аэроакустики [1], построенных на основе уравнений Эйлера, в который входят три основные модели: линейная (линеаризованные уравнения Эйлера), нелинейная для пульсационных компонент (различные формы NLDE — NonLinear Disturbance Equations), нелинейная для всего течения (полные уравнения Эйлера). Действие молекулярной вязкости и теплопроводности реализовано в рамках моделей на основе уравнений Навье—Стокса и их линейных аналогов. Для пространственной дискретизации используются неструктурированные тетраэдральные сетки с центрами в узлах. Численная схема [2] реализуется на расширенном пространственном шаблоне (рис. 1, справа снизу), состоящем из двух противоположных тетраэдров и соседних с их вершинами узлов, и имеет повышенный

### АВТОРЫ:

**А. В. Горобец** – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник Ин-та прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН;

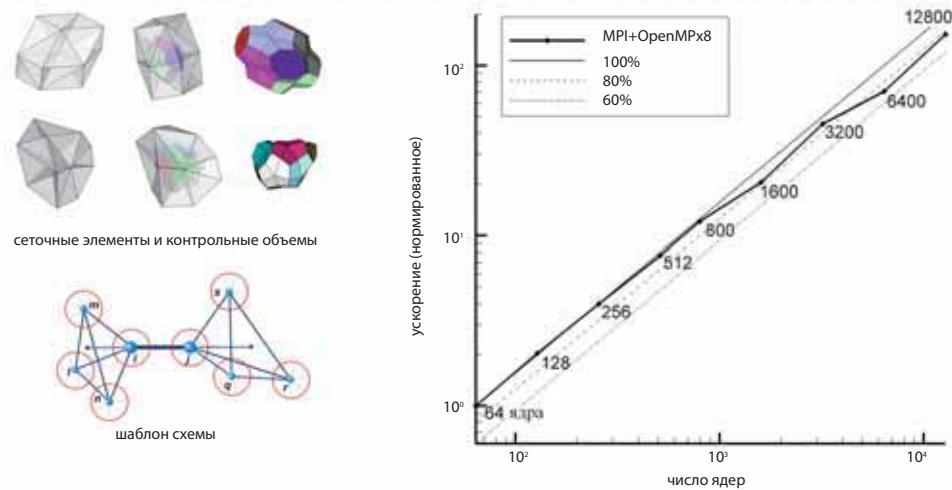
*e-mail: cherepock@gmail.com*

**И. В. Абалакин** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Ин-та прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН;

*e-mail: ilya.abalakin@gmail.com*

**Т. К. Козубская** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, зав. сектором Ин-та прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН;

*e-mail: tata@imamod.ru*



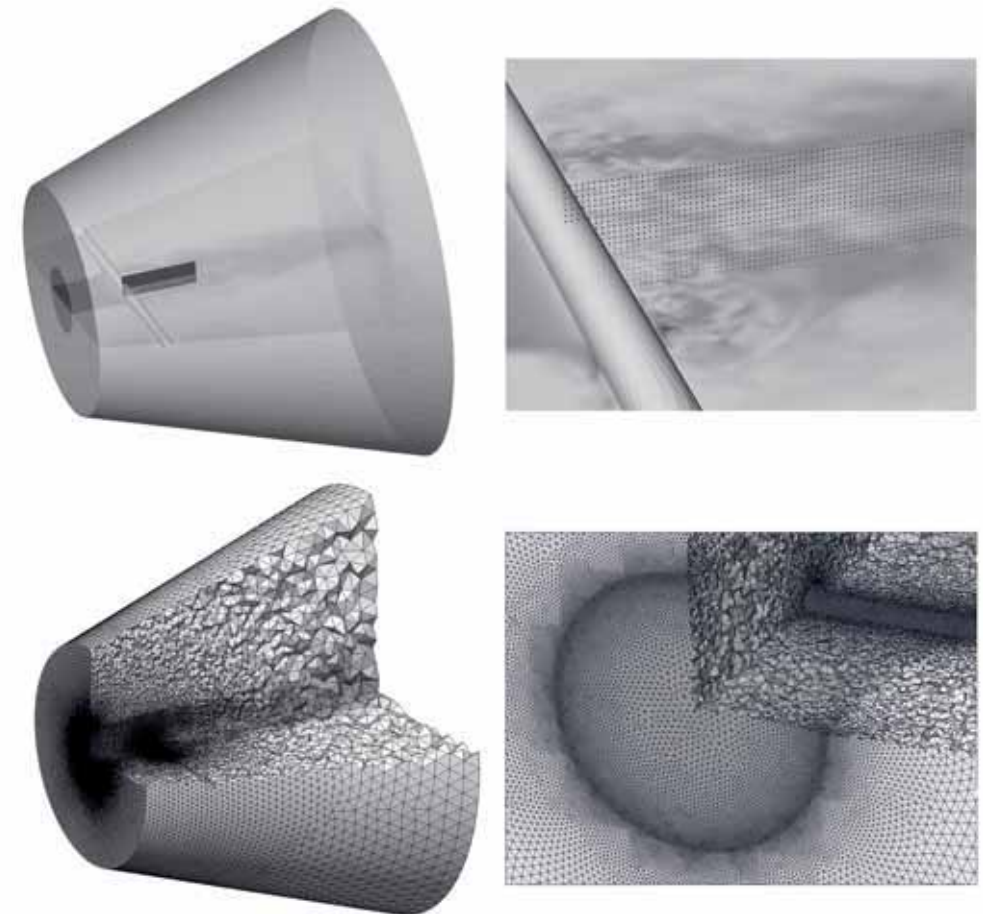
**Рис. 1.** Слева сверху - вид сеточных элементов и контрольных объемов для структурированных (верхний ряд) и неструктурированных (нижний ряд) подобластей сетки. Слева снизу – шаблон численной схемы для вычисления потоков через грани контрольных объемов. Справа – ускорение на суперкомпьютере «Ломоносов» для сетки  $1.6 \cdot 10^7$  узлов,  $10^8$  тетраэдров.

порядок (до 6-го) аппроксимации потоков через грани контрольных объемов, вид которых показан на рис. 1 (слева сверху). Для интегрирования по времени используются явные схемы Рунге-Кутты до 4-го порядка и неявные схемы до 2-го порядка на основе линеаризации по Ньютону.

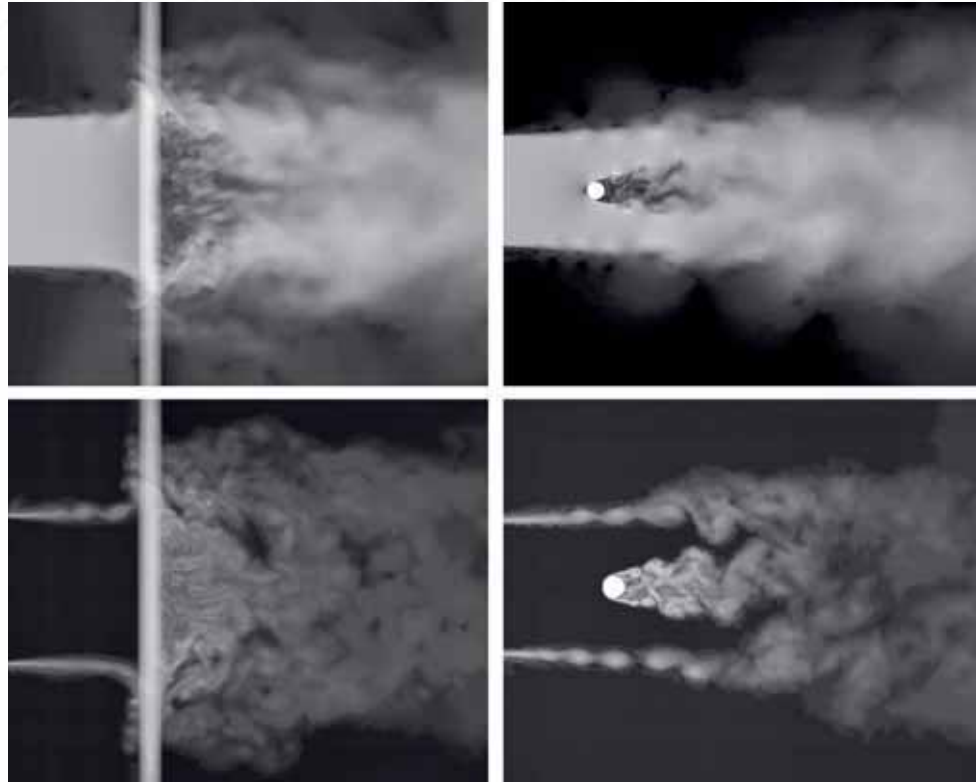
Для расчетов на суперкомпьютерах реализовано гибридное двухуровневое распараллеливание и инфраструктура для крупномасштабных расчетов, включающая параллельные средства обработки больших объемов сеточных данных и результатов. Необходимость применения более сложной параллельной модели обусловлена особенностями современной архитектуры суперкомпьютеров, состоящих из вычислительных узлов, объединенных коммуникационной средой. Каждый узел имеет свое адресное пространство оперативной памяти, поэтому набор узлов представляет собой систему с распределенной памятью. При этом каждый узел имеет несколько процессорных ядер и, таким образом, сам по себе является параллельной системой с общей памятью.

Так называемое двухуровневое, или гибридное, распараллеливание – это подход, при котором на первом уровне работает MPI-распараллеливание для модели с распределенной памятью, а на втором уровне применяется OpenMP для распараллеливания внутри многопроцессорного узла. Благодаря

этому MPI-процессу доступно примерно в  $P_t$  раз больше памяти, где  $P_t$  – число OpenMP нитей, сокращается суммарный объем обмена данными, поскольку в  $P_t$  раз уменьшается число подобластей, и, кроме того, обмены ускоряются за счет того, что процессы не ожидают в очереди на доступ к разделяемым коммуникационным ресурсам узла.



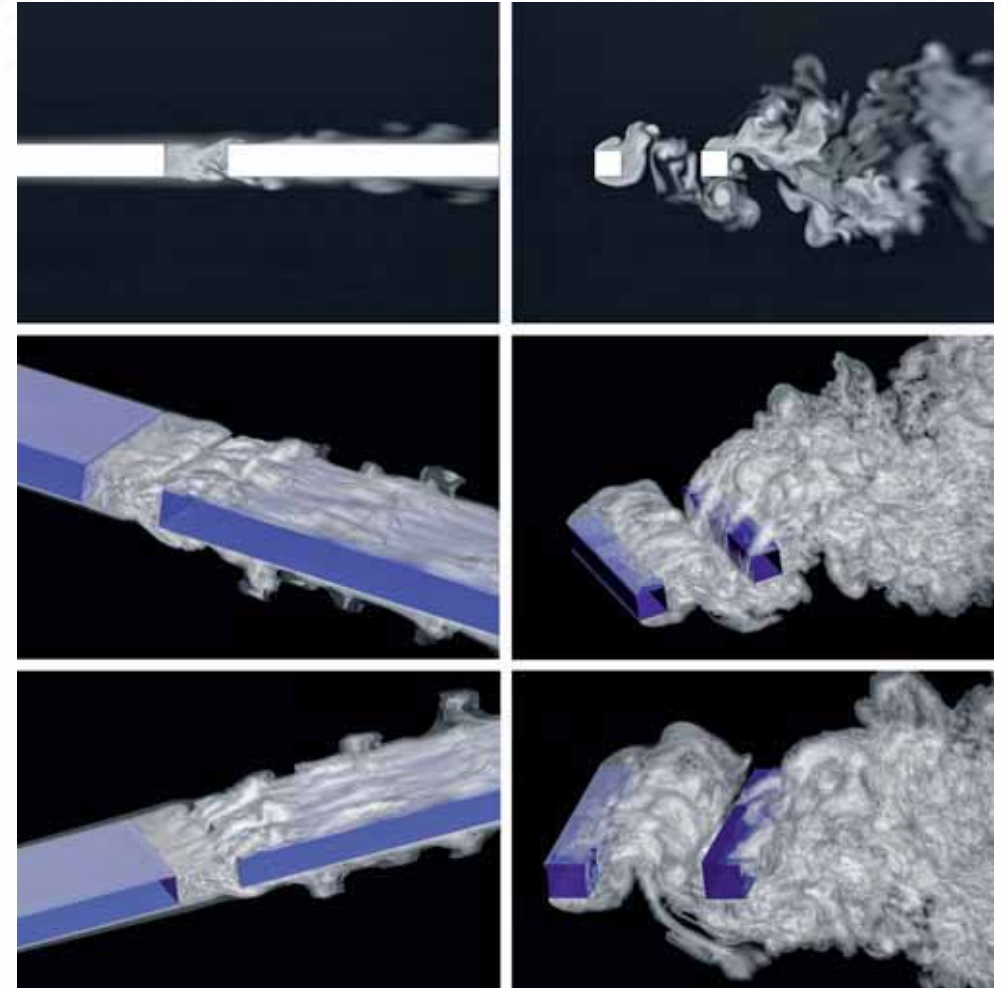
**Рис. 2.** Сверху: слева - вид расчетной области, справа – увеличенная область зоны контрольных точек. Снизу: вид неструктурированной адаптированной сетки (слева) и увеличенный фрагмент области струи (справа), сетка огрублена в 8 раз



**Рис. 3.**  
Визуализация моментальной картины течения (огрубленная, 12% от полного разрешения), вид сверху (слева) и вид сбоку (справа), для поля модуля скорости (сверху) и завихренности (снизу)

На рис. 1 (справа) показано ускорение, полученное на суперкомпьютере «Ломоносов» (МГУ) с применением двухуровневого распараллеливания с 8 OpenMP нитями для сетки  $1,6 \cdot 10^7$  узлов,  $10^8$  тетраэдров. Использовалась явная 4-шаговая схема Рунге–Кутты. Время на один шаг Рунге–Кутты составило 6,7 сек. на 64 ядрах и 0,043 сек. на 12 800 ядрах, ускорение, нормированное по 64 ядрам, 153 раз (эффективность  $\sim 77\%$ ).

Была выполнена серия расчетов конфигурации «струя, набегающая на цилиндр». Эта модельная конфигурация воспроизводит механизмы генерации шума при обтекании стоек шасси и предназначена для исследования и локализации источников шума в турбулентном следе. Физический эксперимент в со-



**Рис. 4.**  
Моментальная картина течения для конфигураций зазор (слева) и две стойки (справа) для поля турбулентной вязкости

ответствующей постановке был выполнен в ЦАГИ, где также была выполнена обработка расчетных данных, сопоставление с экспериментом и анализ полученных результатов [3].

# Суперкомпьютеры для высотного строительства — виртуальное моделирование аэродинамики и расчет ветровых нагрузок на фасады высотных зданий и комплексов

Задача имеет следующие параметры: число Маха 0,206, число Рейнольдса 14 000 (по диаметру цилиндра). В следе за цилиндром размещено 1400 контрольных точек для записи эволюции во времени. Финальная адаптированная сетка со сгущением к краю струи, к области взаимодействия струи с цилиндром и к области контрольных точек, имеет размер  $9 \cdot 10^6$  узлов,  $5 \cdot 10^7$  тетраэдров, безразмерное время интегрирования 1700, задействовалось 1024 ядра. На рис. 2 (сверху) показана схема расчетной области и расположение контрольных точек. Снизу на рис. 2 показан пример неструктурированной адаптированной сетки (огрубленной для визуализации в 8 раз).

На рис. 3 показана картина течения (огрубленная, 12% от полного разрешения), вид сбоку и вид сверху полей модуля скорости и завихренности. В результате расчета была успешно получена информация, позволяющая сделать вывод о расположении источников звука в следе за цилиндром.

Были выполнены аналогичные расчеты для конфигурации “зазор”, воспроизводящей взаимодействие турбулентности с зазором в конструкции летательного аппарата, и конфигурации “две стойки”, воспроизводящей шум от обтекания стоек шасси самолета. На рис. 4 показаны картины течения для данных конфигураций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Abalakin, A. Dervieux, and T. Kozubskaya, “Computational Study of Mathematical Models for Noise DNS”, AIAA-2002-2585 paper.
2. Ilya Abalakin, Alain Dervieux, Tatiana Kozubskaya, High Accuracy Finite Volume Method for Solving Nonlinear Aeroacoustics Problems on Unstructured Meshes, Chinese Journal of Aeroanautics, 19 (2), (2006), pp. 97-104.
3. V. Kopiev, I. Abalakin, G. Faranosov, A. Gorobets, T. Kozubskaya, N. Ostrikov, M. Zaitsev, Experimental and numerical localization of noise sources for cylinder in round jet, Trilateral Russian-French-German Workshop “Computational experiment in aeroacoustics”, Svetlogorsk, September 22-25, 2010, book of abstracts, pp. 75-78.

