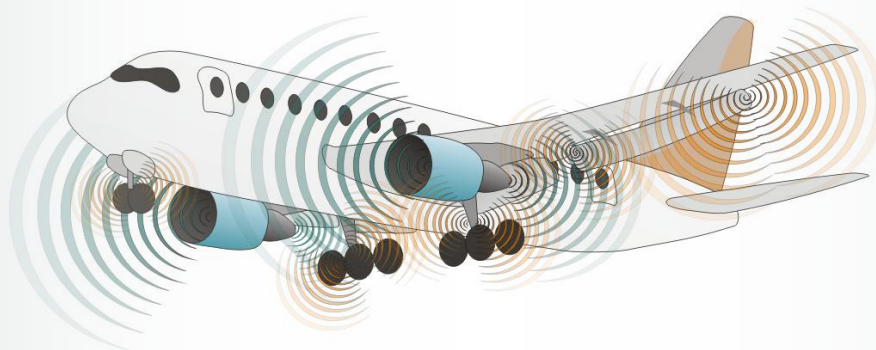


КОМПЛЕКС ПРОГРАММ NOISETTE ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ И АЭРОАКУСТИКИ

ПРОГРЕСС ЗА 2016



И. В. Абалакин, П. А. Бахвалов, В. Г. Бобков, А. В. Горобец,
А. П. Дубень, Н. С. Жданова, Т. К. Козубская



Сектор вычислительной аэроакустики
<http://caa.imamod.ru>



**Ордена Ленина Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт прикладной
математики им. трижды Героя Социалистического
Труда М. В. Келдыша Российской Академии Наук**

Комплекс программ **NOISEtte** для CFD/CAA расчетов



**Решение задач вычислительной аэродинамики и аэроакустики
на основе алгоритмов повышенной точности
на неструктурированных сетках**

Моделирование сжимаемых турбулентных течений

Коллектив разработчиков

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

- И. Абалакин, к. ф.-м. н., с.н.с.
- П. Бахвалов, к. ф.-м. н., м.н.с.
- В. Бобков, м.н.с.
- А. Горобец, к. ф.-м. н., с.н.с.
- О. Доронина, аспирант
- А. Дубень, к. ф.-м. н., м.н.с.
- Н. Жданова, к. ф.-м. н., н.с.
- Т. Козубская, д. ф.-м. н., зав. сект.
- А. Климов, студент МФТИ
- С. Суков, к. ф.-м. н., с.н.с.
- F.X. Trias, PhD

Заказчики и партнеры по научной работе

ЦАГИ, ОАО «Авиадвигатель» (Пермь), ОАО «Камов»,
ОАО «ОКБ Сухого», РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров), МФТИ,
Минобрнауки, РФФИ, UPC (Испания), EU FP7, ...



Математические модели

• Базовая система уравнений для сжимаемого газа

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{Q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{Q})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{Q})}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{F}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial z} \right)$$

\mathbf{Q} – вектор полных или линеаризованных консервативных переменных,
 \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} – вектора полных или линеаризованных консервативных потоков
 \mathbf{F}_ν , \mathbf{G}_ν , \mathbf{H}_ν – диссипативных, Re – число Рейнольдса.

• Семейство моделей Эйлера

- EE – полные уравнения Эйлера
- NSE – полные уравнения Навье-Стокса
- LEE – линеаризованные уравнения Эйлера
- NLDE – уравнения Эйлера, нелинейные для возмущений

• Модели турбулентности

- RANS, URANS (SA, KE, KO, SST)
- LES (Смагоринский, S3PQ, S3QR, S3PR, WALE, Sigma, Vreman, Verstappen)
- DES, DDES, IDDES, PANS

• Погруженные граничные условия – IBC

• Метод расчета акустики в дальнем поле FW/H

• Стохастические методы генерации входного сигнала и турбулентных полей

- Белый шум, заданный спектр
- SNGR модель

Численные методы

• Неструктурированные сетки

- Треугольные/тетраэдральные сетки
- Гибридные сетки (элементы до 6 граней)

• Схемы повышенной точности

- EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией
- Полиномиальная конечно-объемная схема

• Римановские солверы:

- Годунов, Роу, Хуанг

• Маломаховые течения

- Предобуславливатель Туркеля

• Разрывные решения

- WENO-EBR схемы
- MUSCL-TVD EBR схемы

• Интегрирование по времени

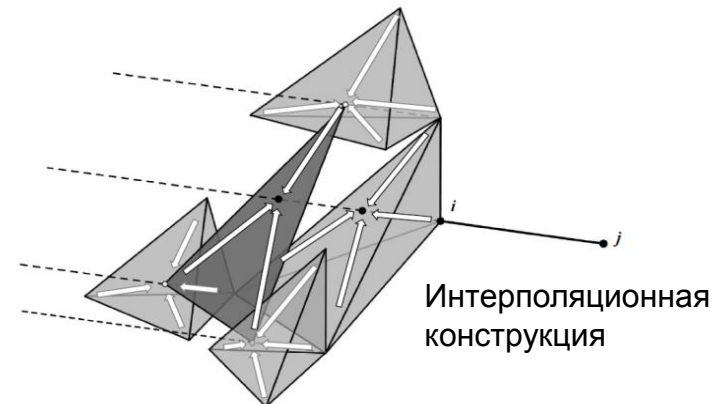
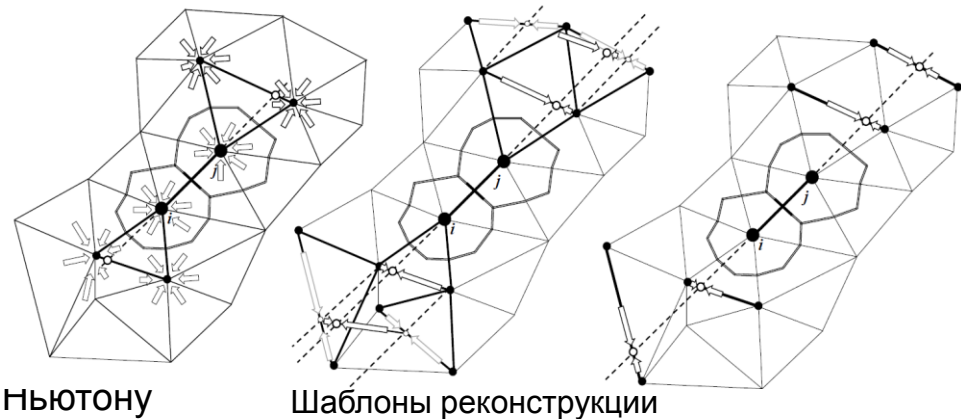
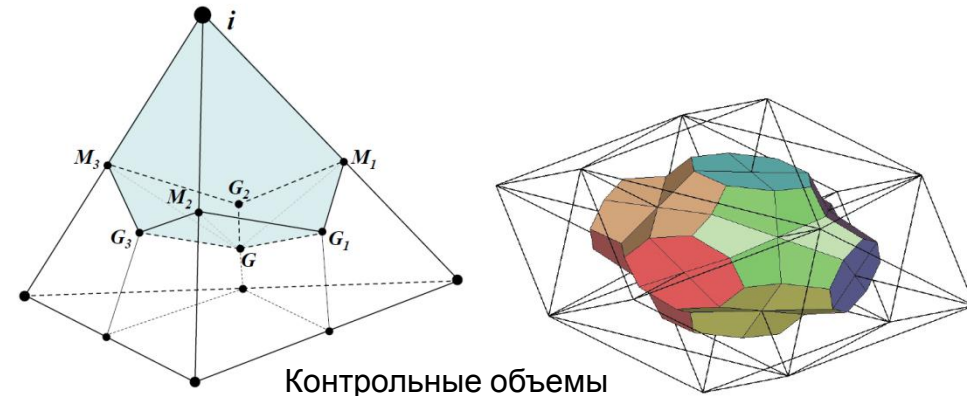
- Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
- Неявная схема 1-2 порядка с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений

• Решатели СЛАУ

- BICG-Stab с локальными блочными предобуславливателями
- Мультисистемный режим

• Граничные условия

- Твердые стенки – отражение, прилипание
- Неотражающие граничные условия
- Периодические условия - с топологическим замыканием

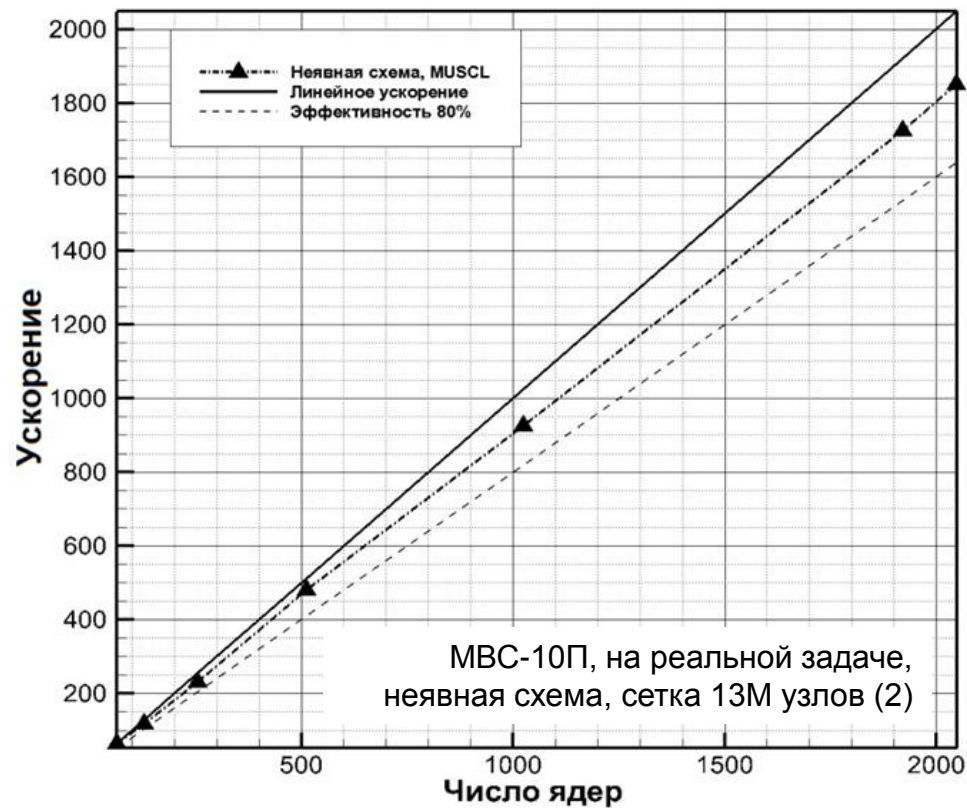
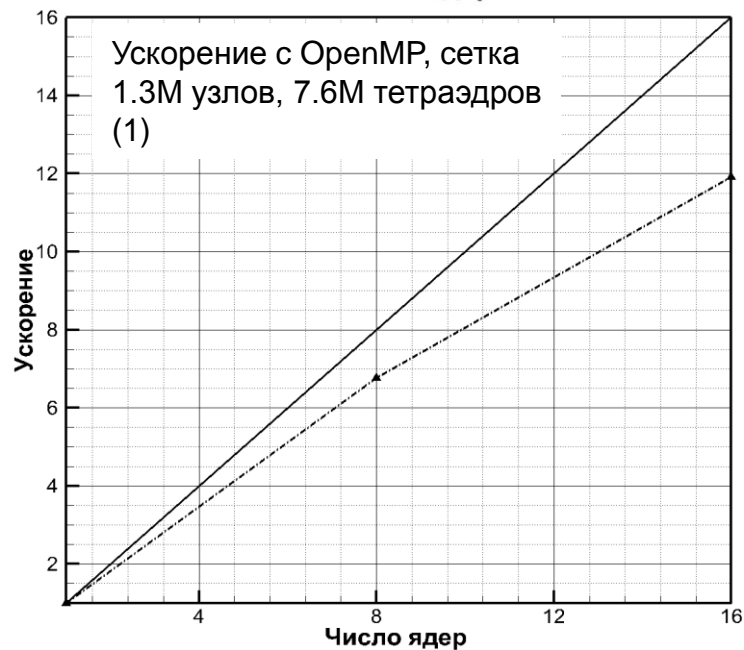
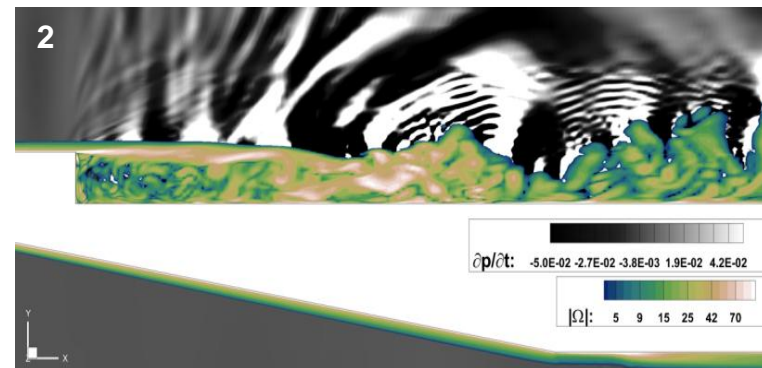
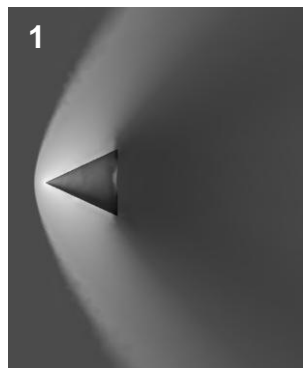
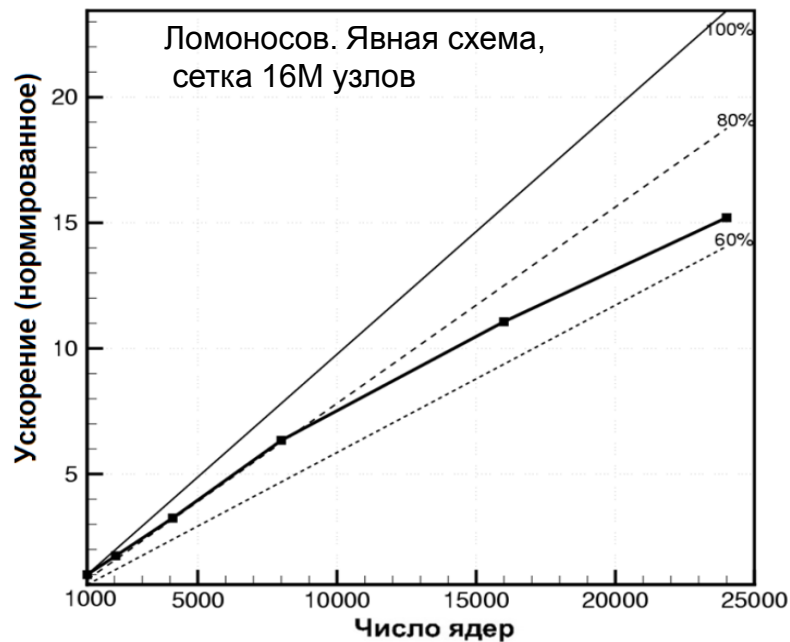


Параллельные технологии

- **Многоуровневое распараллеливание MPI+OpenMP**
для систем с числом ядер более 100000
- **Существенно-многопоточное распараллеливание**
с общей памятью на сотни нитей
- **Полная адаптация алгоритма к потоковой обработке**
совместимость с массивно-параллельными ускорителями.
- **Гетерогенные вычисления**
Использование ускорителей Intel Xeon Phi
в симметричном режиме
- **Параллельная инфраструктура пре- и постпроцессора**
распределенная обработка данных сверхбольшого объема,
неструктурированные сетки с числом элементов более миллиарда.
- **Высокая производительность вычислений**
явная схема ~15-20% от пика CPU ядра, расход памяти ~2 КБ на узел;
неявная схема ~10-15% (в тестах на Intel Xeon X5670), 4 ~ 5 КБ узел.
- **Встроенные средства:**
инструментальное профилирование, менеджер памяти, контроль стека, счетчик производительности

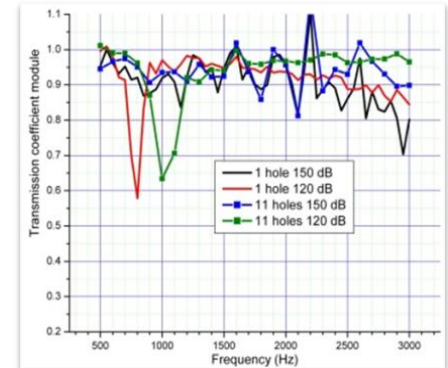
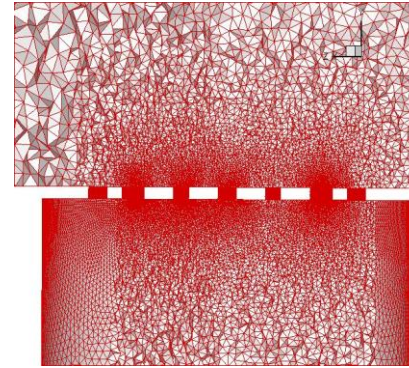
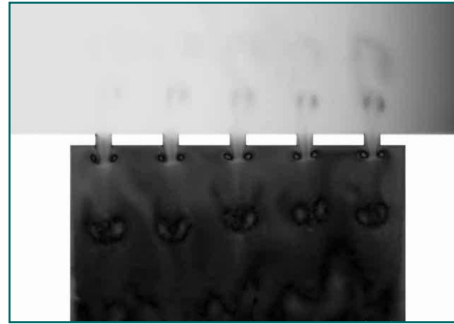
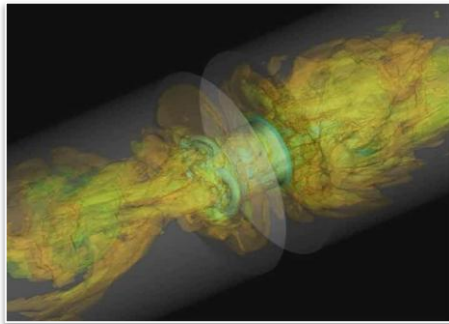


Параллельные технологии

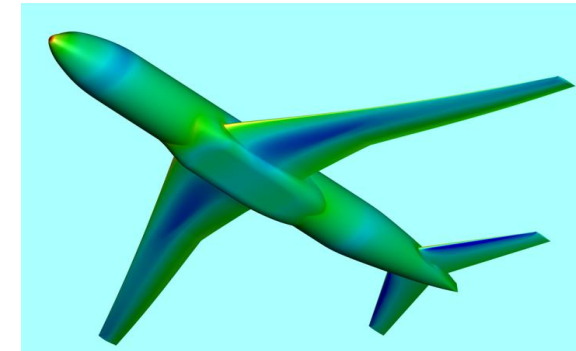
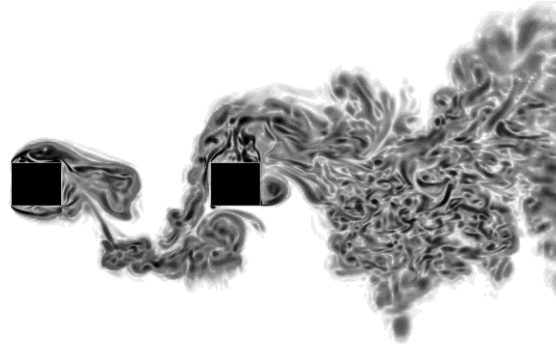
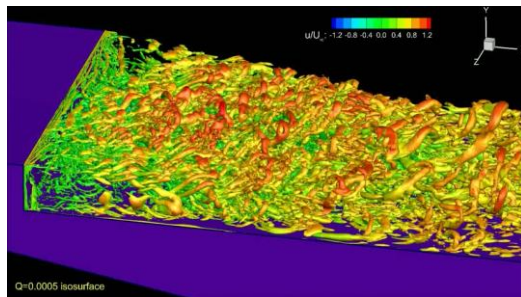


Спектр решаемых задач: аэродинамика и аэроакустика

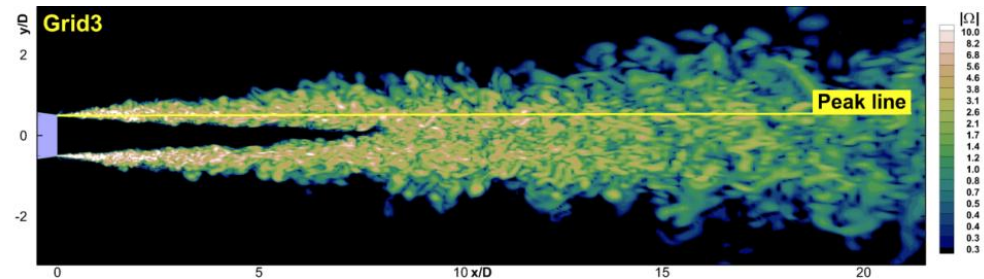
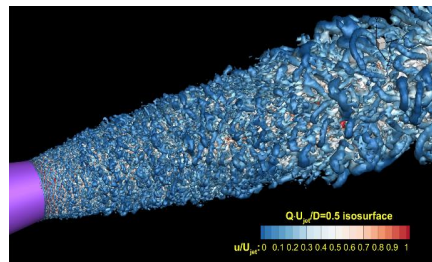
Звукопоглощающие конструкции



Турбулентные течения в задачах внешнего обтекания



Струи



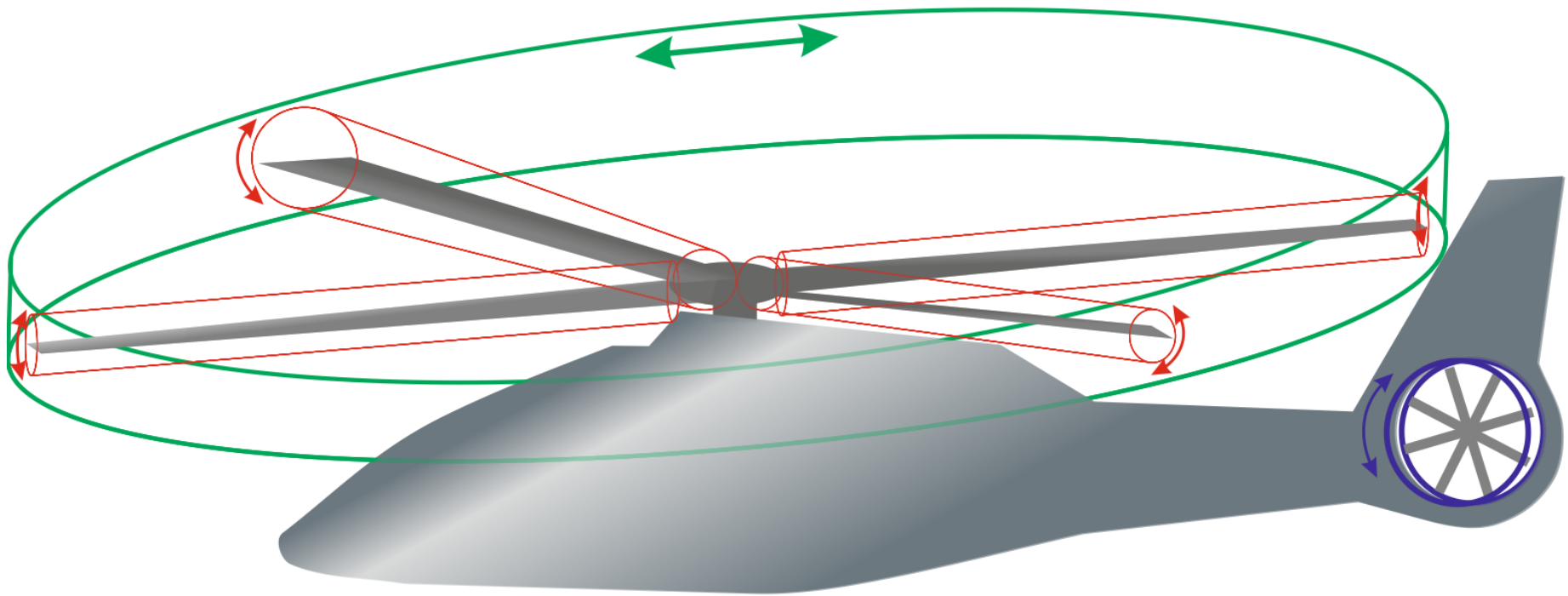
Маломаж, дозвук, свержзвук, гиперзвук

Прогресс за 2016 год

- Динамически адаптивные сетки
- Новая схема Unsteady Flux Correction
- Новый метод расчета подсеточного масштаба
- Автоматический IJK-режим построения реберно-ориентированной схемы
- Гиперзвуковые течения
- Улучшения по параллельным вычислениям
- Новые расчеты

Динамические сетки: скользящий интерфейс Scheiben

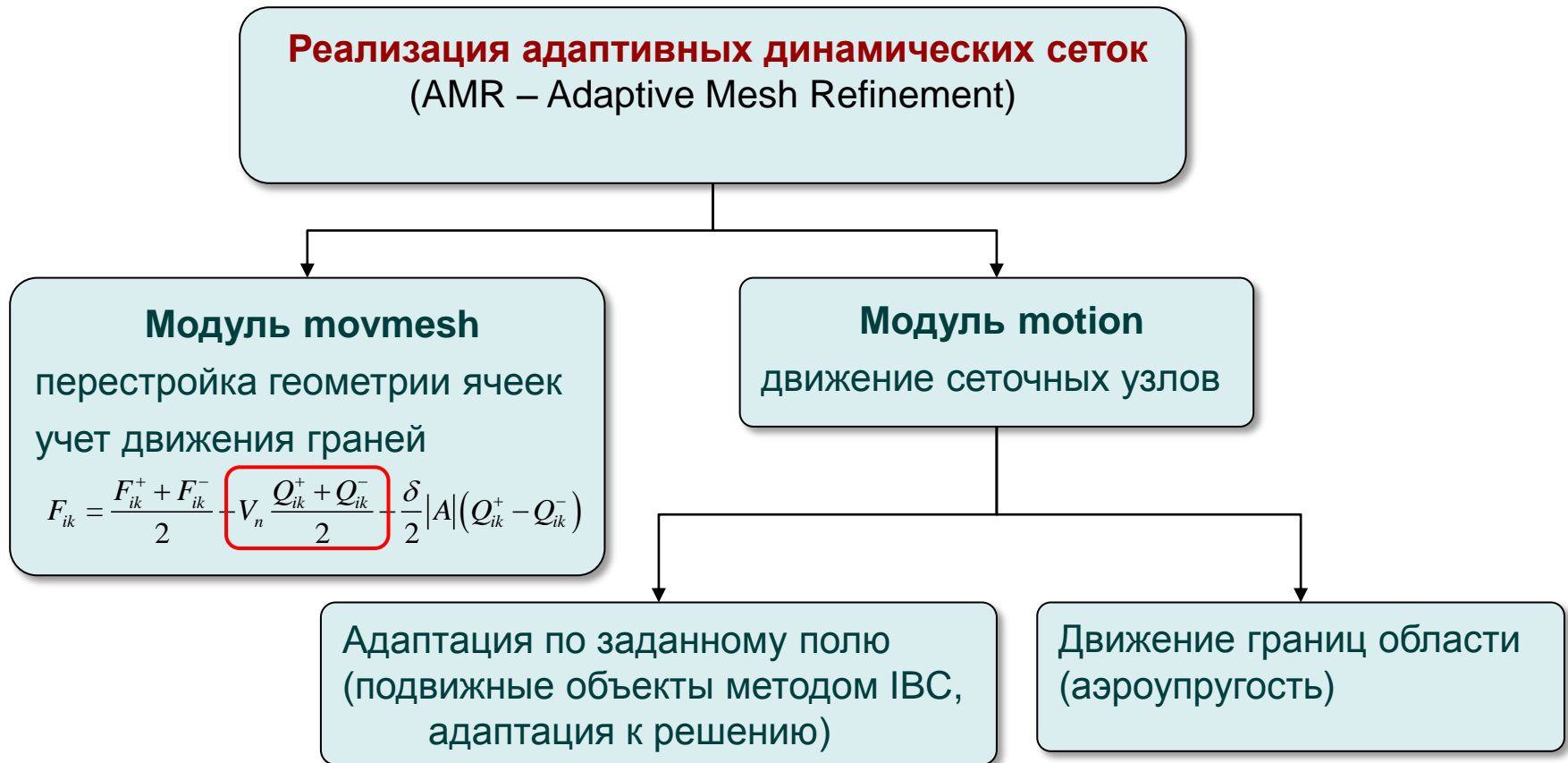
- Адаптация объёмно-центрированных схем с квазиодномерной реконструкцией переменных для расчётов на скользящих сетках
- Форма вращающихся подобластей цилиндрическая
- Допускаются вложенные подобласти, вращающиеся вокруг разных осей
- Реализовано для уравнений Эйлера и Навье-Стокса с сохранением 2-го порядка точности



П. А. Бахвалов, В. Г. Бобков, Т. К. Козубская, Применение схем с квазиодномерной реконструкцией переменных для расчётов на неструктурированных скользящих сетках, Математическое моделирование, 28:8 (2016), 13–32

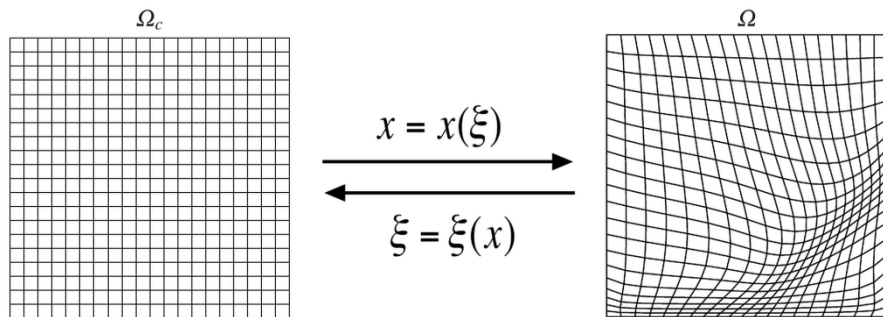
Динамически адаптивные сетки

- Динамическая адаптация без изменения топологии на основе перераспределения узлов сетки (“r-методы” или “moving mesh”)
- Отсутствие переинтерполяции решения
- Сохранение принципов распараллеливания, аналогичных для неподвижных сеток
не вносится дисбаланс, не требуется динамическая балансировка загрузки



Динамически адаптивные сетки

Основа метода адаптации: построение взаимно однозначного отображения между вычислительной и расчётной областями

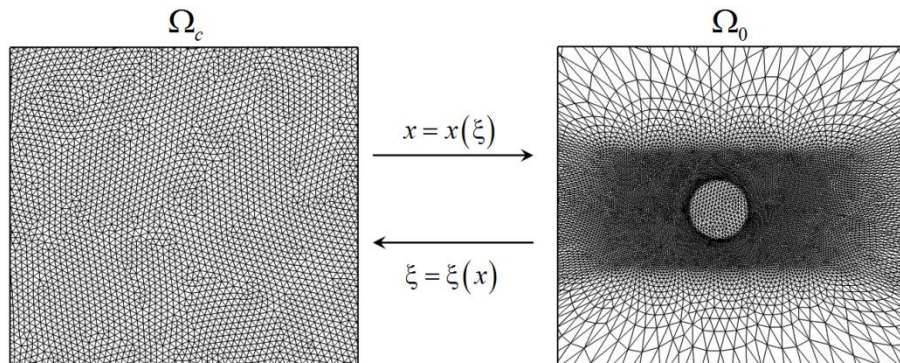


$$\Omega: a = x_1 < x_2 \dots < x_N = b, \quad \int_{x_1}^{x_2} \gamma(x) dx = \dots = \int_{x_{N-1}}^{x_N} \gamma(x) dx$$

$$\Omega_c: 0 = \xi_1 < \xi_2 \dots < \xi_N = 1, \quad \xi_j = (j-1)/(N-1)$$

$$\int_a^{x(\xi_j)} \gamma(x) dx = \xi_j \int_a^b \gamma(x) dx \longrightarrow \frac{d}{d\xi} \left(\gamma(x) \frac{dx}{d\xi} \right) = 0$$

$$x(0) = a, \quad x(1) = b$$



$$\nabla(\gamma(\mathbf{x}) \nabla \mathbf{x}) = 0 *$$

$$\mathbf{x}(\xi_{\partial\Omega_c}) = \varphi(\mathbf{x})$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \frac{1}{\gamma(\mathbf{x})} \nabla(\gamma(\mathbf{x}) \nabla \mathbf{x}) = 0$$

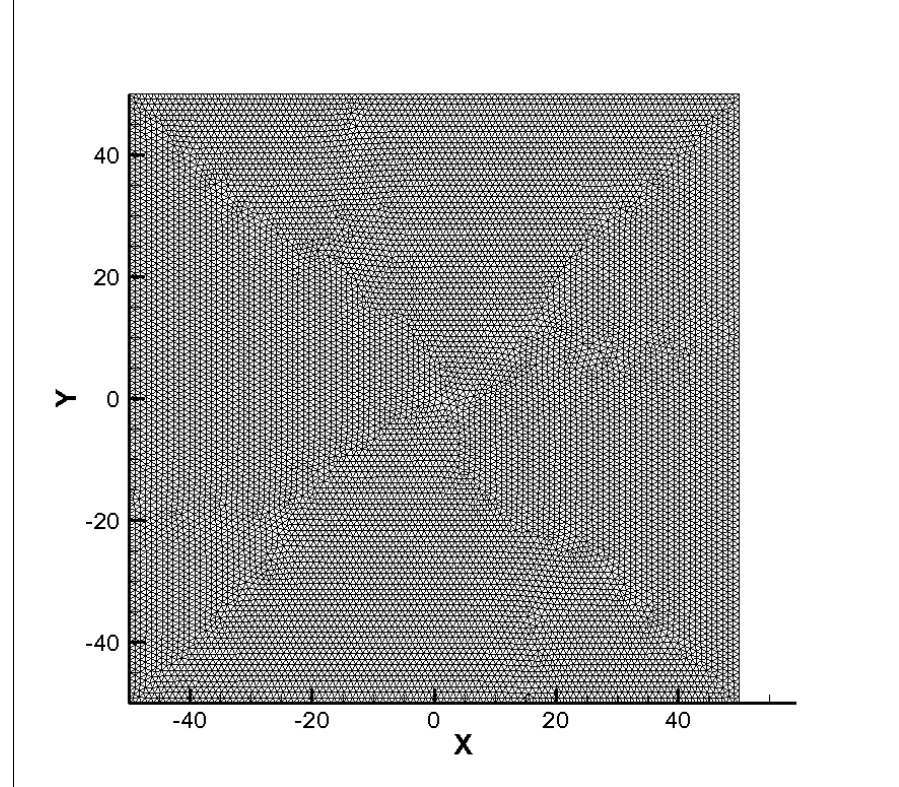
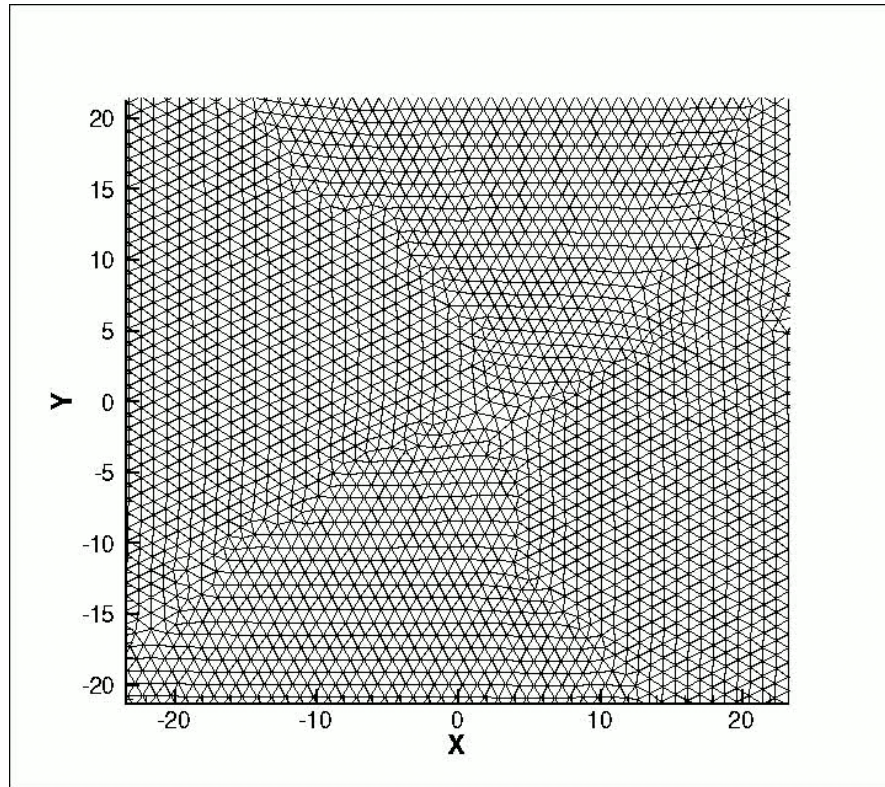
$$x(\mathbf{x}, 0) = \varphi(\mathbf{x}_{\Omega_0})$$

*Winslow A. J. Comput. Phys. (1967) 1: 149

**Cao W., et al. J. Comput. Phys. (1967) 149: 221 MMPDE5 - метод

Динамически адаптивные сетки

Примеры работы адаптации

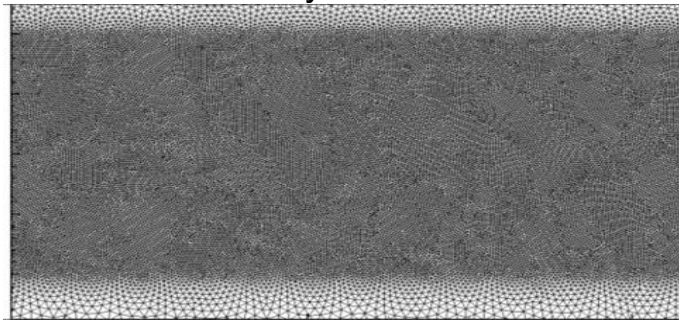


Динамически адаптивные сетки

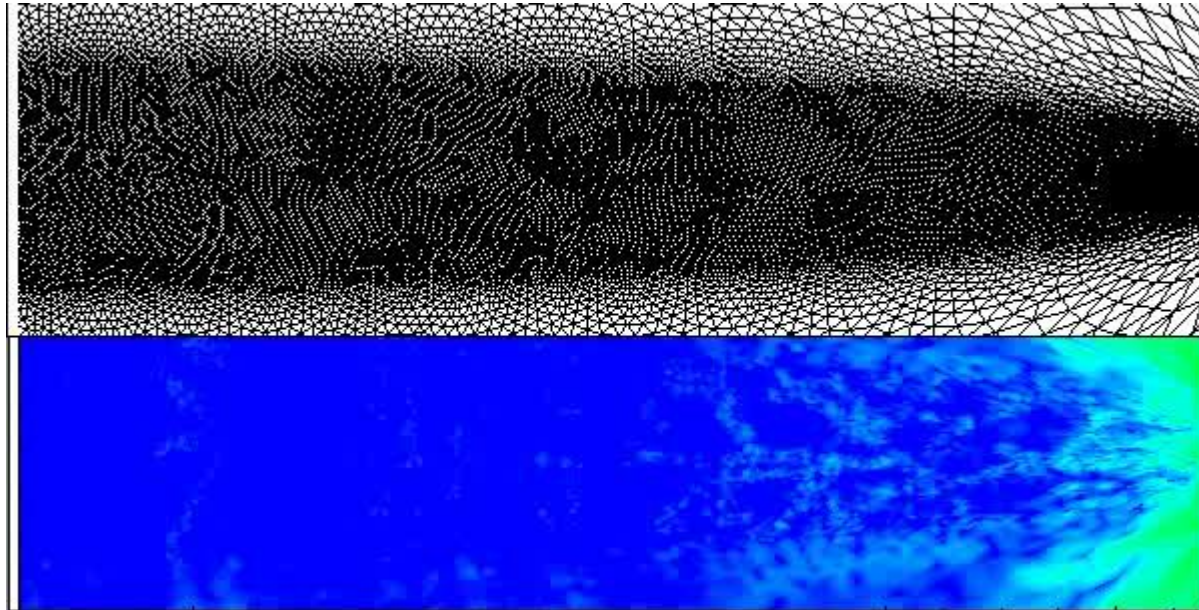
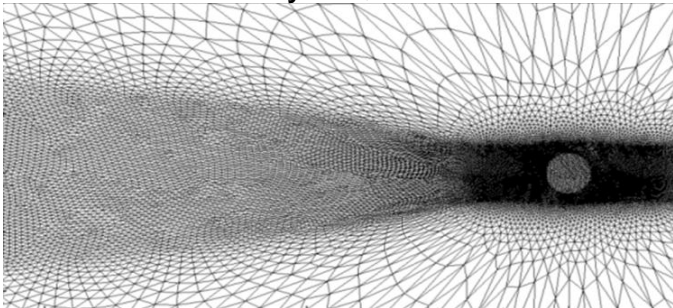
Пример работы AMR + IBC режима на движении цилиндра, $Re=200$

| | Референс | Сетка 1 | Сетка 2 | Сетка 2A |
|---------|-------------|---------|---------|----------|
| Sh | 0.19 | 0.189 | 0.186 | 0.191 |
| Cd_mean | 1.34 | 1.218 | 1.118 | 1.301 |

Сетка 1: 391628 узел, 782824 элемент



Сетка 2: 110272 узел, 20230 элемент



Динамически адаптивные сетки

Пример адаптации к произвольному полю

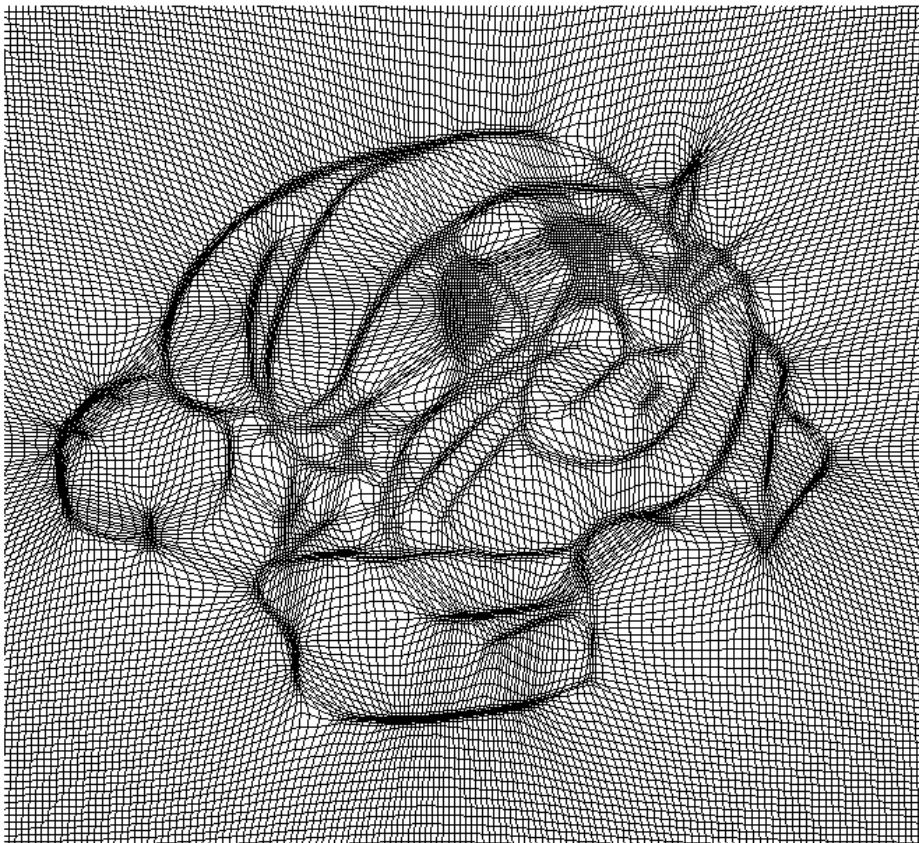
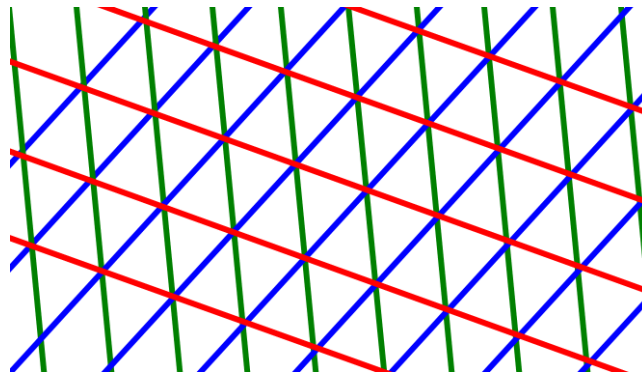


Схема Unsteady flux correction (UFC)

Основные свойства

- Для адаптивных сеток – сохраняется шаблон схемы, низкая вычислительная стоимость построения геометрии
- Сохраняет точность на квадратичной функции (для гладких решений) в стационарных задачах, точность на линейной функции в нестационарных задачах
- Использует спектральные элементы для аппроксимации градиентов
- Низкая вычислительная стоимость схемы
- 3-й порядок для стационарных задач
- 3-й порядок для нестационарных задач на TC-сетках



TC-сетка

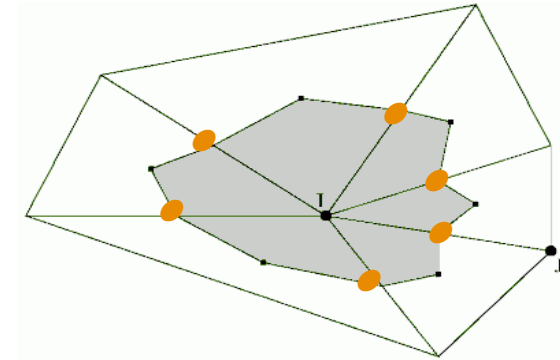
- 2-й порядок для нестационарных задач на произвольных неструктурированных сетках

Бахвалов П.А., Козубская Т.К. Модификация схемы Flux Corrector для повышения точности решения нестационарных задач Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015, № 69. 24 с.

Схема Unsteady flux correction (UFC)

Исходная схема Flux correction (FC) на примере уравнения переноса

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{a} \cdot \nabla u = 0$$



$$\frac{du_i}{dt} + [\mathbf{a} \cdot \nabla u]_i^{FC} = 0$$

$$[\nabla u(x)]_i^{FC} = \frac{1}{V_i} \sum_{j \in N_1(i)} \mathbf{n}_{ij} u_{ij}$$

$$u_{ij} = \begin{cases} u_{ij}^{(i)}, & \mathbf{a}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} \geq 0 \\ u_{ij}^{(j)}, & \mathbf{a}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} < 0 \end{cases} \quad \begin{aligned} u_{ij}^{(i)} &= u_i + \frac{1}{2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \nabla u(\mathbf{r}_i) \\ u_{ij}^{(j)} &= u_j + \frac{1}{2} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \nabla u(\mathbf{r}_j) \end{aligned}$$

$\nabla u(\mathbf{r}_i), \nabla u(\mathbf{r}_j)$ Должны вычисляться с необходимой точностью

Katz A., and Sankaran V., "An Efficient Correction Method to Obtain a Formally Third-Order Accurate Flow Solver for Node-Centered Unstructured Grids," Journal of Scientific Computing, Vol. 51, 2012

Схема Unsteady flux correction (UFC)

Схема Unsteady flux correction (FC) на примере уравнения переноса

Исходная FC схема
$$\frac{du}{dt} + [\mathbf{a} \cdot \nabla u]^{FC} = 0$$

UFC схема :

$$\frac{du}{dt} + \mathbf{U} [\mathbf{a} \cdot \nabla u]^{FC} = 0$$

Матрица U такая, что

1. схема остается консервативной
2. схема должна быть точной на линейной функции
3. новое свойство - 3й порядок на ТС сетках на нестационаре

$$u_{ik} = \begin{cases} \frac{C}{12} \frac{v_i + v_k}{2v_i}, & k \in N_1(i) \\ 1 - \frac{C}{12} \sum_{k \in N_1(i)} \frac{v_i + v_k}{2v_i}, & k = i \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

Схема Unsteady flux correction (UFC)

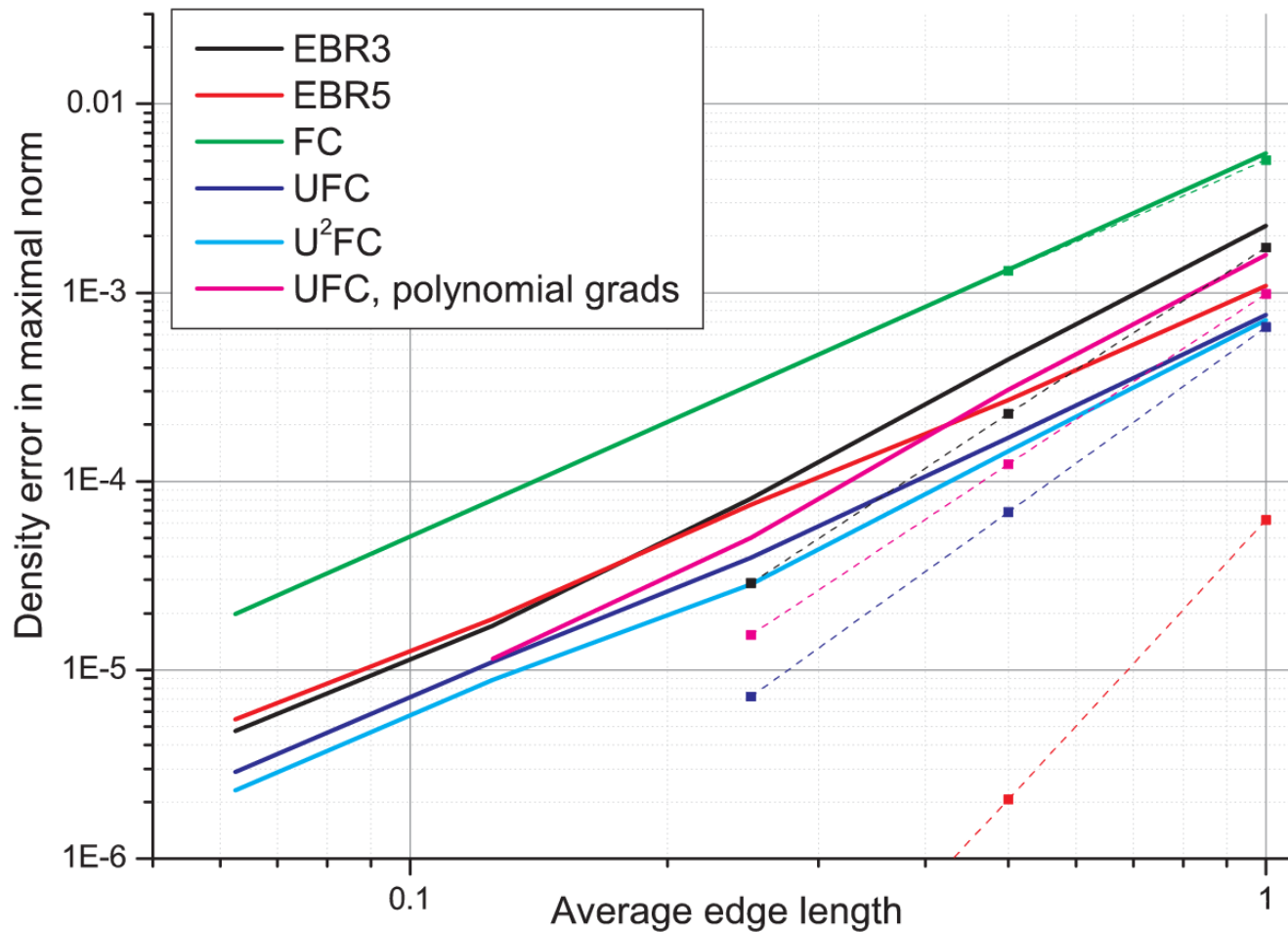
Тестирование на гауссовом импульсе, LEE

| Схема | | EBR3 | EBR5 | Steady FC | UFC | |
|----------|--------------|---------|---------|-----------|----------------|---|
| С-норма | h=1 | 6.71e-3 | 7.41e-4 | 1.15e-2 | 4.10e-3 | Тетраэдральные ТС-сетки |
| | h=1/2 | 9.71e-4 | 2.63e-5 | 2.75e-3 | 5.14e-4 | |
| | num. order | 2.79 | 4.84 | 2.06 | 3.00 | |
| L1-норма | h=1 | 1.66e-3 | 1.59e-4 | 3.12e-3 | 9.78e-4 | |
| | h=1/2 | 2.31e-4 | 7.71e-6 | 8.03e-4 | 1.21e-4 | |
| | num. order | 2.85 | 4.88 | 1.96 | 3.01 | |
| | theor. order | 3 | 5 | 2 | 3 | |
| С-норма | h=1 | 4.79e-3 | 1.82e-3 | 1.39e-2 | 2.82e-3 | Квази-однородные тетраэдральные сетки |
| | h=1/2 | 6.54e-4 | 4.36e-4 | 3.21e-3 | 3.51e-4 | |
| | h=1/4 | 1.04e-4 | 1.09e-4 | 7.68e-4 | 5.99e-5 | |
| | num. order | 2.65 | 2.41 | 2.00 | 2.55 | |
| L1-норма | h=1 | 7.23e-4 | 2.50e-4 | 2.35e-3 | 4.45e-4 | |
| | h=1/2 | 9.70e-5 | 5.15e-5 | 6.02e-4 | 5.70e-5 | |
| | h=1/4 | 1.37e-5 | 1.24e-5 | 1.51e-4 | 8.22e-6 | |
| | num. order | 2.94 | 2.03 | 2.01 | 2.79 | |
| | theor. order | 2 | 2 | 2 | 2 | |

Бахвалов П.А., Козубская Т.К. Модификация схемы Flux Corrector для повышения точности решения нестационарных задач Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015, № 69. 24 с.

Модифицированная схема Unsteady flux correction (UFC)

Тестирование на гауссовом импульсе, LEE



Сходимость на неструктурированных и TC (пунктир) треугольных сетках

Новый метод расчета подсеточного масштаба

$$\partial_t \bar{u} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla^2 \bar{u} - \nabla \bar{p} - \nabla \cdot \tau(\bar{u}) ; \quad \nabla \cdot \bar{u} = 0$$

eddy-viscosity $\longrightarrow \tau(\bar{u}) = -2\nu_e S(\bar{u})$

$$\nu_e = (C_m \delta)^2 D_m(\bar{u})$$

$D_m(\bar{u}) \longrightarrow$ Smagorinsky (1963), WALE (1999), Vreman (2004),
QR-model (2011), σ -model (2011), S3PQR² (2015)...

$C_m \longrightarrow$ Germano's dynamic model (1991), Lagrangian dynamic (1995),
Global dynamic approach (2006)

$\delta?$

²F.X.Trias, D.Folch, A.Gorobets, A.Oliva. *Building proper invariants for eddy-viscosity subgrid-scale models*, **Physics of Fluids**, 27: 065103, 2015.

F.X.Trias, A.Gorobets, A.P.Duben, and A.Oliva. "Building a new subgrid characteristic length for LES". In Fourth International Workshop Computational Experiment in AeroAcoustics, Svetlogorsk, Russia, September 2016.

Новый метод расчета подсеточного масштаба

- In the context of **LES**, most popular (by far) is:

$$\delta_{\text{vol}} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \leftarrow \text{Deardorff (1970)}$$

$$\delta_{\text{SCO}} = f(a_1, a_2) \delta_{\text{vol}}, \quad \delta_{L^2} = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)/3}$$

- In the context of **DES**:

$$\delta_{\text{max}} = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \leftarrow \text{Sparlart et al. (1997)}$$

Recent flow-dependant definitions

$$\delta_{\omega} = \sqrt{(\omega_x^2 \Delta y \Delta z + \omega_y^2 \Delta x \Delta z + \omega_z^2 \Delta x \Delta y) / |\omega|^2} \leftarrow \text{Chauvet et al. (2007)}$$

$$\tilde{\delta}_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{n,m=1,\dots,8} |l_n - l_m| \leftarrow \text{Mockett et al. (2015)}$$

$$\delta_{\text{SLA}} = \tilde{\delta}_{\omega} F_{\text{KH}}(VTM) \leftarrow \text{Shur et al. (2015)}$$

F.X.Trias, A.Gorobets, A.P.Duben, and A.Oliva. "Building a new subgrid characteristic length for LES". In Fourth International Workshop Computational Experiment in AeroAcoustics, Svetlogorsk, Russia, September 2016.

Новый метод расчета подсеточного масштаба

Idea: δ , appears in a natural way when we consider the leading term of the Taylor series expansion of the subgrid stress tensor,

$$\underbrace{\tau(\bar{u}) = \frac{\delta^2}{12} \mathbf{G} \mathbf{G}^T + \mathcal{O}(\delta^4)}_{\text{physical space}}$$

$$\underbrace{\tau(\bar{u}) = \frac{1}{12} \mathbf{G}_\delta \mathbf{G}_\delta^T + \mathcal{O}(\delta^4)}_{\text{computational space}}$$

A **least-square minimization** leads to

$$\delta_{\text{lsq}} = \sqrt{\frac{\mathbf{G}_\delta \mathbf{G}_\delta^T : \mathbf{G} \mathbf{G}^T}{\mathbf{G} \mathbf{G}^T : \mathbf{G} \mathbf{G}^T}}$$

$$\underbrace{\mathbf{G} \equiv \nabla \bar{u}}_{\text{physical space}}$$

$$\underbrace{\mathbf{G}_\delta \equiv \mathbf{G} \Delta}_{\text{computational space}}$$

where for a Cartesian grid $\Delta \equiv \begin{bmatrix} \Delta x & & \\ & \Delta y & \\ & & \Delta z \end{bmatrix}$

Новый метод расчета подсеточного масштаба

$$\delta_{\text{lsq}} = \sqrt{\frac{G_{\delta} G_{\delta}^T : G G^T}{G G^T : G G^T}}$$

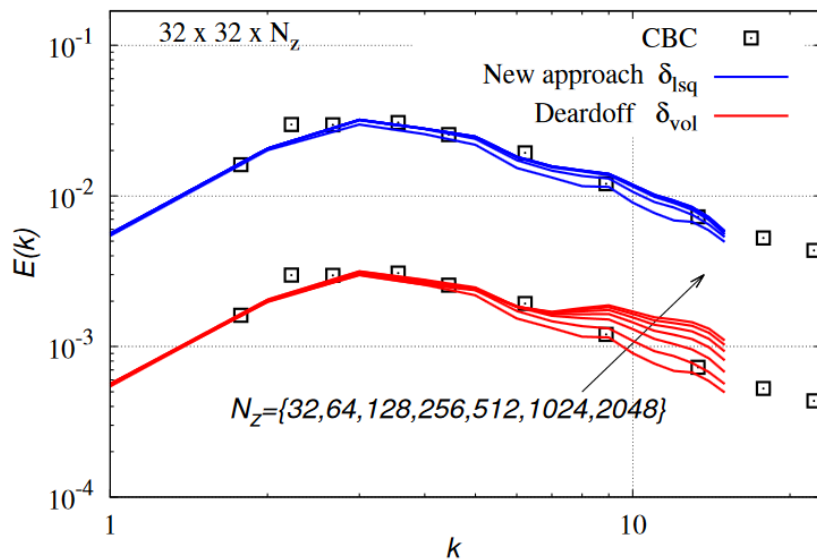
- Locally defined: only G and Δ needed ($G_{\delta} \equiv G \Delta$)
- Well-bounded: $\Delta x \leq \delta_{\text{lsq}} \leq \Delta z$ (assuming $\Delta x \leq \Delta y \leq \Delta z$)
- Sensitive to flow orientation, e.g. for rotating flows ($G = \Omega$)

$$\delta_{\text{lsq}} = \sqrt{\frac{\omega_x^2(\Delta y^2 + \Delta z^2) + \omega_y^2(\Delta x^2 + \Delta z^2) + \omega_z^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)}{2|\omega|^2}}$$

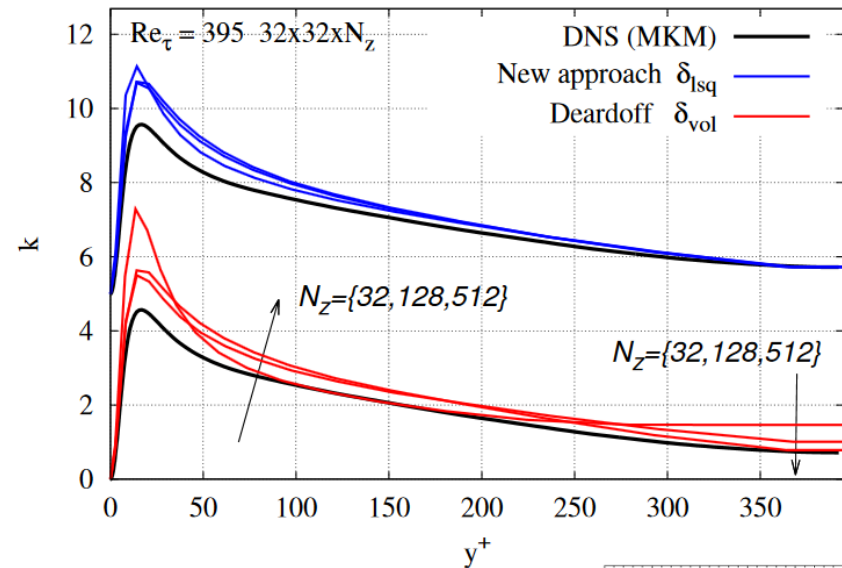
- Applicable to unstructured meshes
- Easy and cheap

Новый метод расчета подсеточного масштаба

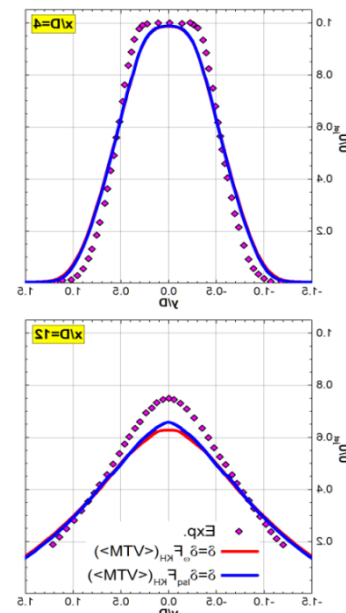
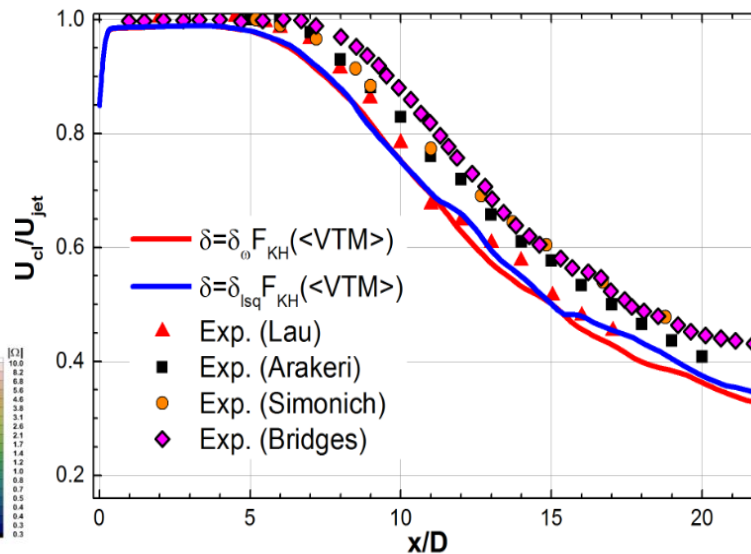
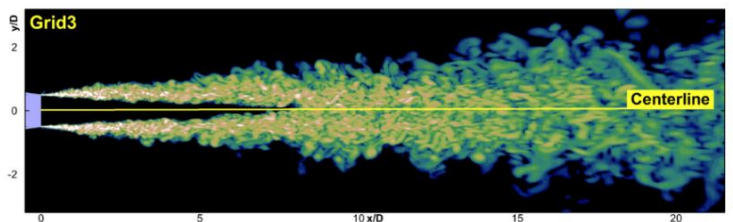
Comparison with classical
Comte-Bellot & Corrsin (CBC) experiment



$Re_\tau = 395$ DNS Moser et al. LES $32 \times 32 \times N_z$



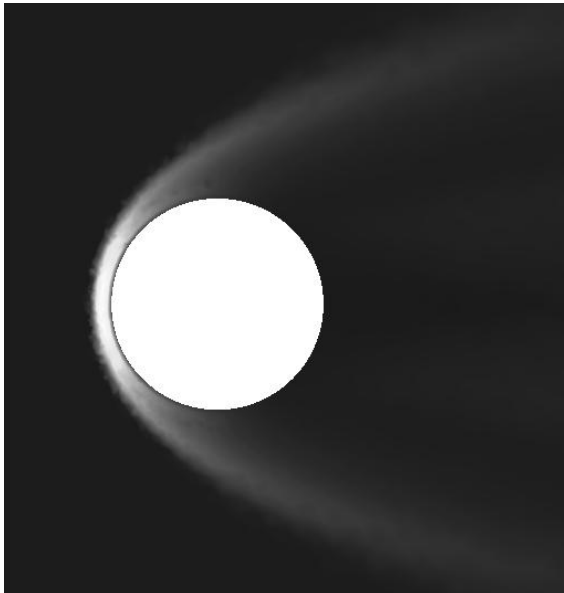
- $Re = 1.1 \times 10^6$ $M = 0.9$
- DES results using NOISEtte code
- Meshes: **1.52M**, 4.13M and 8.87M
- Comparison of $\tilde{\omega}$ and δ_{lsq}



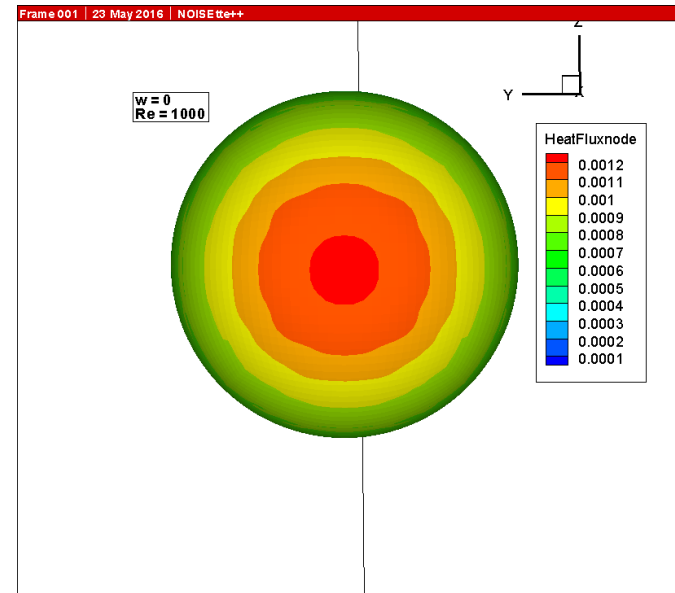
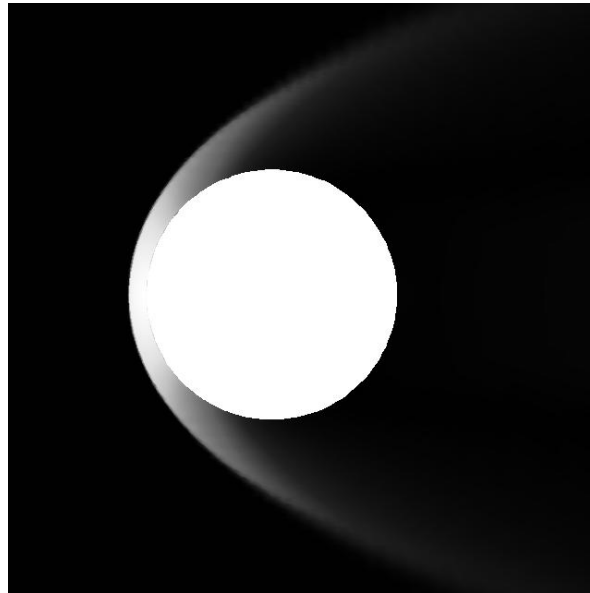
Гиперзвуковые течения

- Реализованы римановские солверы HLLE, HLLC, Лакса-Фридрихса
- Модификации EBR схемы EBR-WENO3 и EBR-WENO5
- Течение вокруг вращающейся сферы
 $M=10$; $w=0, 0.1, 0.2$; $Re=4500, 45000$

Сетка 120 тыс. узлов

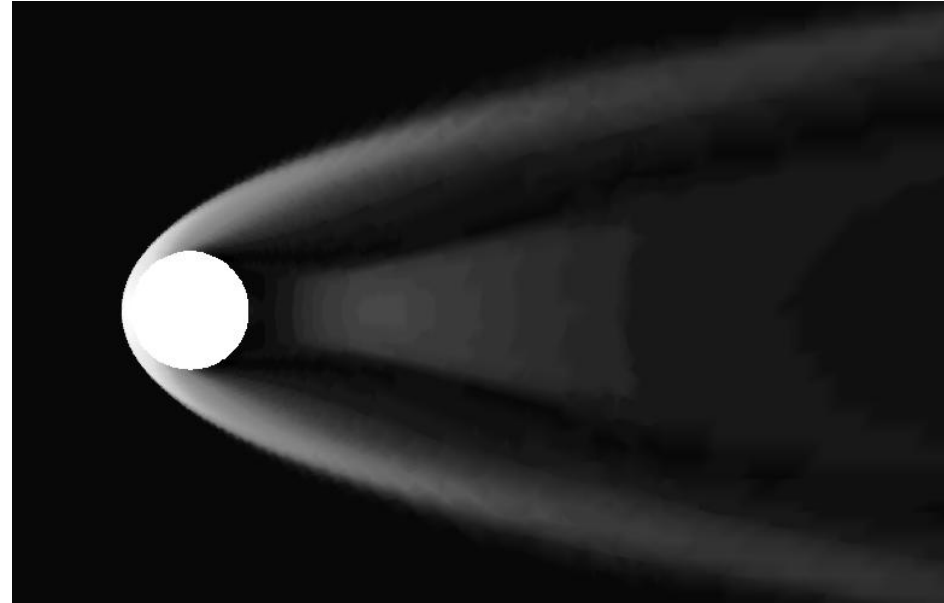
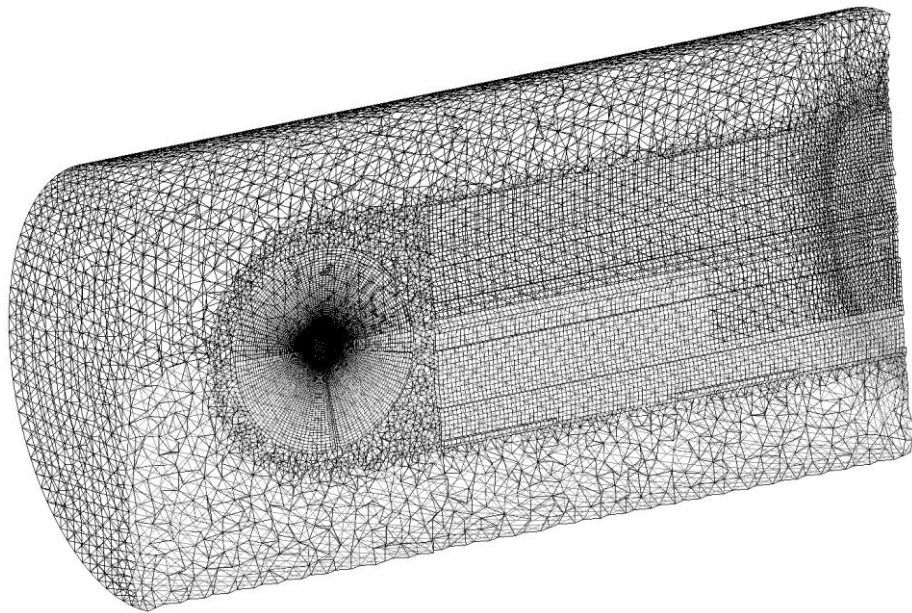


Гибридная сетка 900 тыс. узлов



Гиперзвуковые течения

- Реализованы римановские солверы HLLE, HLLC, Лакса-Фридрихса
- Модификации EBR схемы EBR-WENO3 и EBR-WENO5
- Течение вокруг вращающейся сферы
 $M=10$; $w=0, 0.1, 0.2$; $Re=4500, 45000$



Улучшения распараллеливания

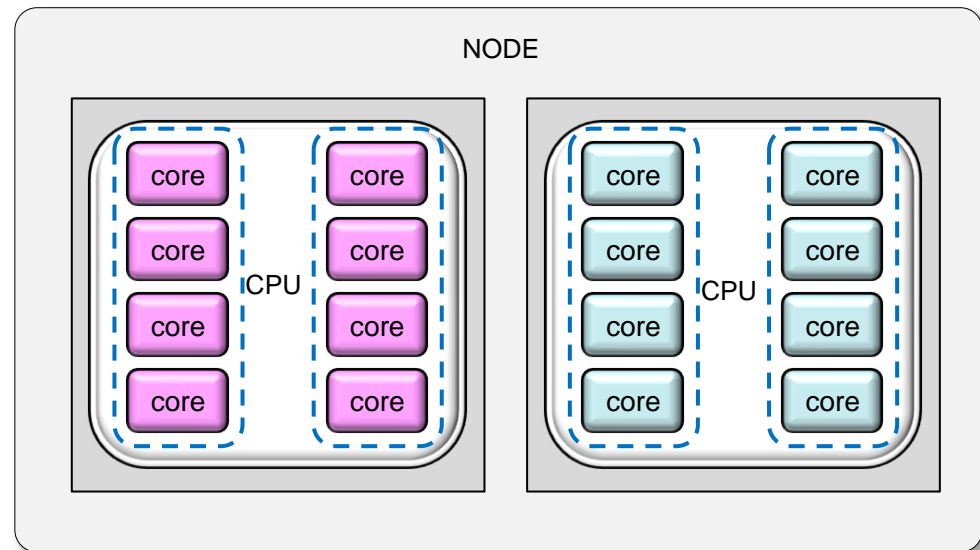
- Реализована автоматическая конфигурация распараллеливания

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| NODE_NS | число сокетов |
| NODE_CPS | ядер на сокет |
| NODE_TPC | поток на ядро |
| NODE_Torder | нумерация вирт. процессоров |

| | |
|-------------------|-------------------|
| MPI_NP | число процессов |
| MPI_PPN | процессов на узел |
| MPI_ID | ID процесса |
| MPI_Porder | нумерация |
| MPI_LID | локальный ID |

| | |
|---------------|---------------|
| OMP_NT | число потоков |
| OMP_TN | номер потока |

1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0



0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1

Улучшения распараллеливания: генерация маски привязки потоков

Ресурсы узла представлены в виде списка виртуальных процессоров (VP)

$$NVP = NODE_NS \times NODE_CPS \times NODE_TPC$$

Битовая маска для каждого потока определяет, на каких VP он может выполняться

0 – этот VP недоступен потоку

1 – этот VP доступен потоку

Представление в виде 3D bool массива $A[NODE_NS][NODE_CPS][NODE_TPC]$

Преобразование в 1D битовую маску по $[NODE_TPC][NODE_NS][NODE_CPS]$

Пример – два 6-ядерных CPU с HT

| CPU0 HT0 | CPU1 HT0 | CPU0 HT1 | CPU1 HT1 | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| 1 1 1 1 1 1 | 1 1 1 1 1 1 | 1 1 1 1 1 1 | 1 1 1 1 1 1 | - всё доступно |
| 1 1 1 1 1 1 | 0 0 0 0 0 0 | 1 1 1 1 1 1 | 0 0 0 0 0 0 | - только один CPU |
| 0 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 0 | 0 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 0 | - только одно ядро |

Улучшения распараллеливания: автоопределение параметров

- Все параметры узла определяются через файл /proc/cpuinfo

```
...
processor           : 23
vendor_id          : GenuineIntel
cpu family         : 6
model              : 45
model name         : Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 0 @ 2.00GHz
stepping           : 7
cpu MHz            : 1200.000
cache size         : 15360 KB
physical id        : 1
siblings           : 12
core id            : 5
cpu cores          : 6
...
```

- Параметры MPI запуска – через hostname или функцией 3-го стандарта

```
int MPI_Comm_split_type(MPI_Comm comm, int split_type, int key, MPI_Info info, MPI_Comm *newcomm)
```

```
split_type = MPI_COMM_TYPE_SHARED
```

Улучшения распараллеливания

- Правильно выставленная привязка предотвращает миграцию потоков между сокетами или NUMA-узлами, выполнение процесса более чем на одном сокете или NUMA-узле
 - потери на кэш когерентность между сокетами
 - потери на собственно потерю кэш
 - потери на NUMA фактор
- Пример на расчете течения вокруг сферы $M=10$
гибридная сетка 882524 узлов, 1495364 элементов
- Расчет на двух узлах кластера K-10
 $MPI_NP = 4$, $MPI_PPN=2$
узлы: 2 x 8-core Intel Xeon CPU E5-2660 2.20GHz

Исходная привязка – всё разрешено всем потокам

1.35 сек.

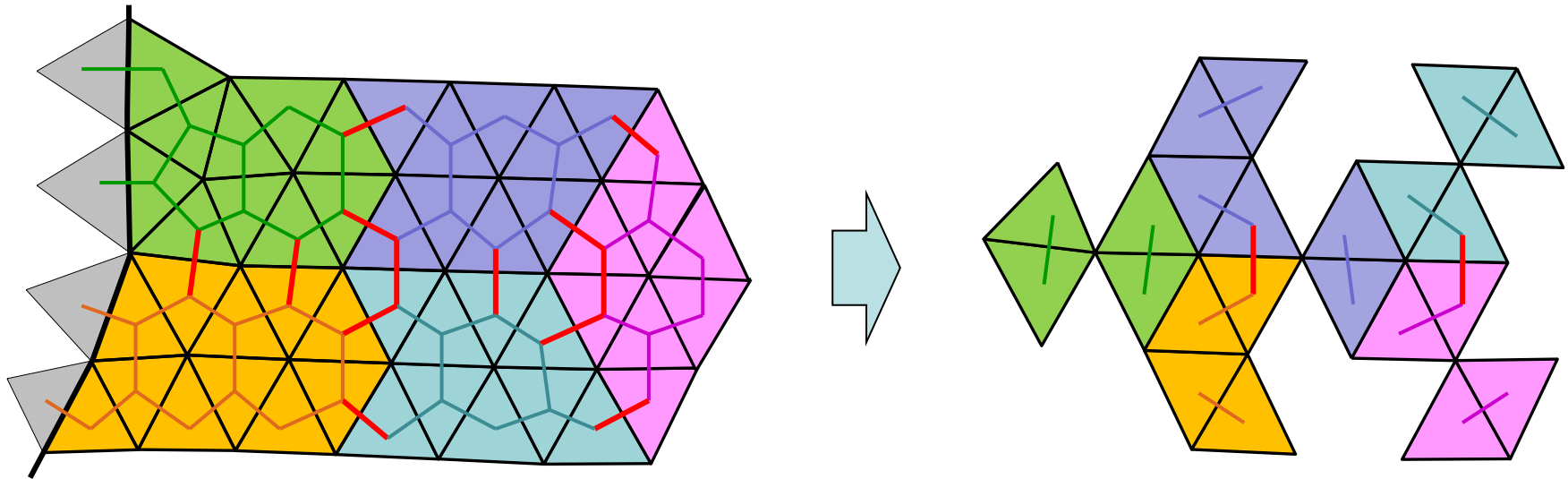
Правильная привязка по конкретным ядрам

0.92 sec

Унифицированное многоуровневое распараллеливание

Все операции по граням, сеточным элементам, граничным граням, ребрам распараллелены единым образом

- Для MPI подобласти строится граф и делается разбиение на внутренние подобласти
- Из интерфейсных элементов, связанных с ячейками (узлами) из разных подобластей, формируется новый граф
- Для нового графа выполняется декомпозиция следующего уровня
- Процесс повторяется, пока интерфейс не исчезнет



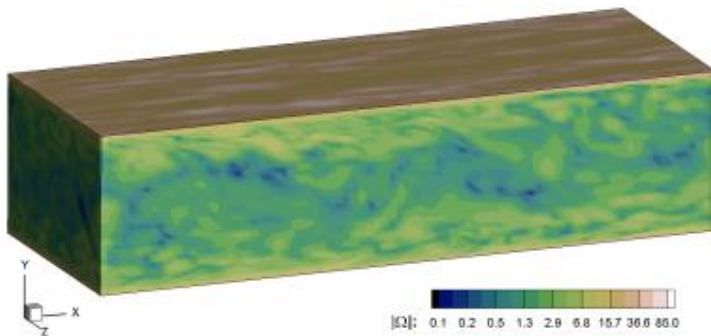
Горобец А. В. "Параллельная технология численного моделирования задач газовой динамики алгоритмами повышенной точности", ЖВМ и МФ, т. 55, №4, с. 641-652, 2015.

Распараллеливание инициализации

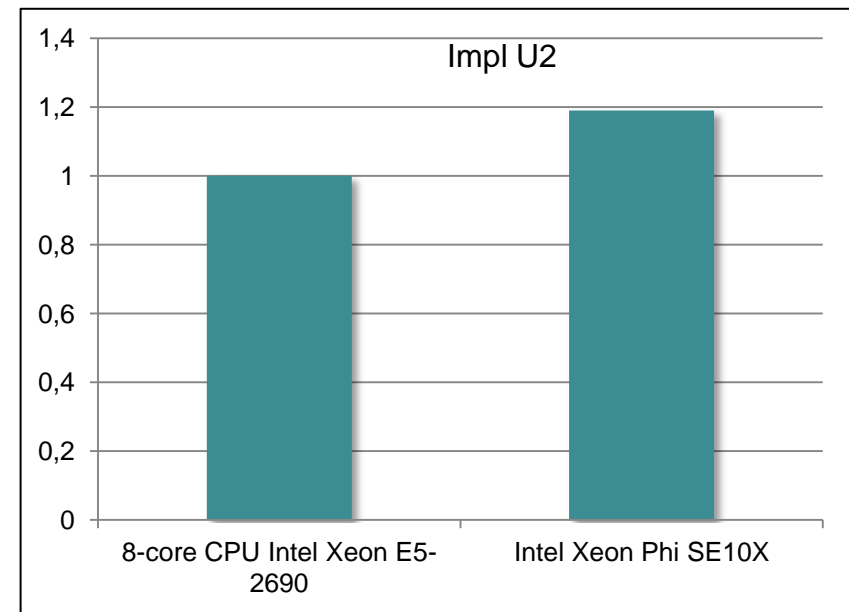
Для расчетов на ускорителях Intel Xeon Phi

- Выполнен поиск и распараллеливание теневой нагрузки, незаметной на CPU
- Распараллеливание вычислительно-емкой инициализации
ускорение на Phi около 10 раз относительно последовательного режима

| Операция | Внутреннее ускорение |
|------------------------------------|----------------------|
| Реконструкция конвективных потоков | 124 |
| Расчет диссипативных потоков | 74 |
| Расчет узловых градиентов | 65 |
| Общее | 92 |

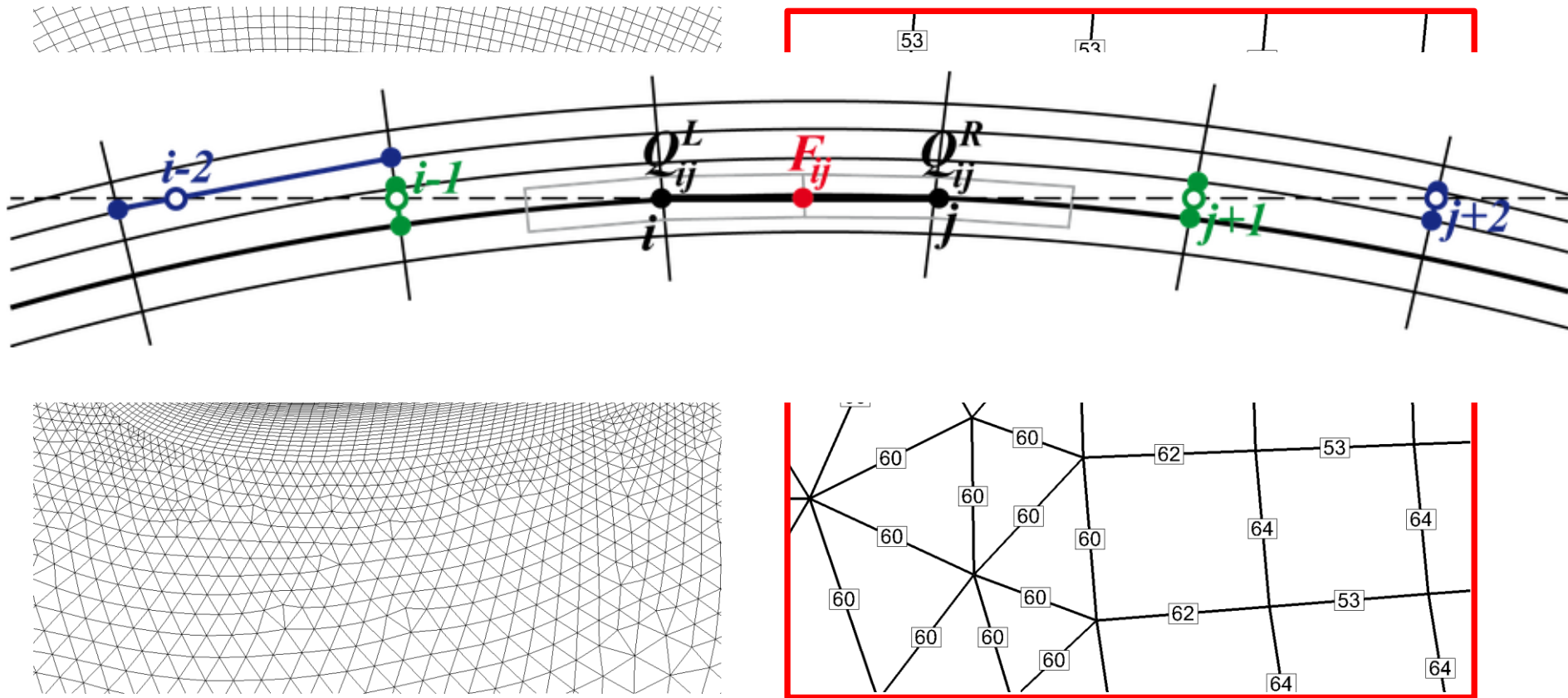


Установившееся течение в канале



Автоматический IJK-режим построения реберно-ориентированной схемы

- Автоматическое определение сеточной линии, вдоль которой будет происходить реконструкция
- Локально для каждого ребра
- В случае неструктурированной сетки – переход на EBR интерполяционные конструкции



$N/10$ = общее количество точек в шаблоне

$N\%10$ = количество точек в шаблоне вдоль сеточной линии (IJK)

Модификация схемы для течений с малыми числами Маха

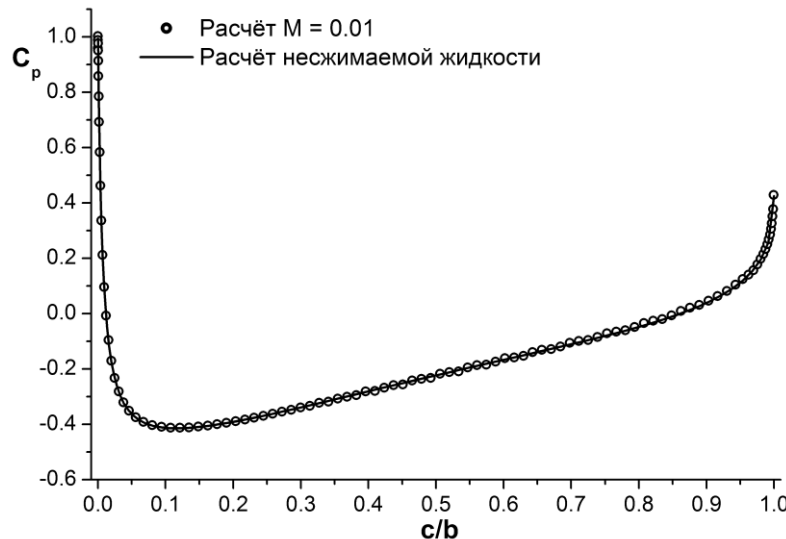
Модификация диссипативной части в методе Roe

F. Rieber. A low-Mach number fix for Roe's approximate Riemann solver
Journal of Computational Physics, 2011, v.230, №13, p.5263-5287.

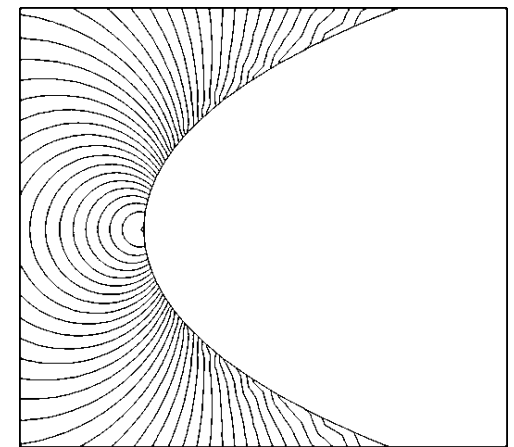
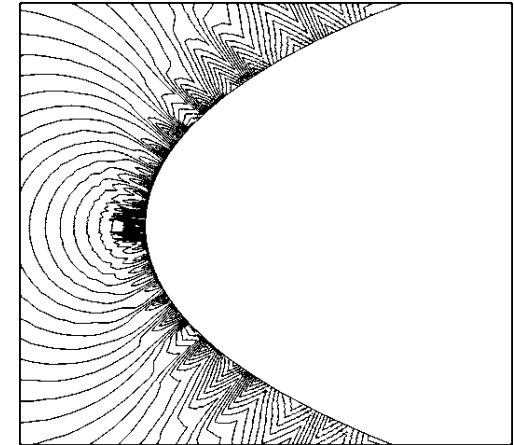
Тестирование на невязком обтекании NASA0012

коэффициент силы сопротивления

| Тип сетки | M = 0.15 | M = 0.01 | M = 0.001 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| Структурированная | -0.851e-5 | -1.000e-5 | -1.092e-5 |
| Неструктурированная | 1.630e-5 | 2.022e-5 | 2.201e-5 |



Сравнение коэффициента давления на поверхности M=0.01
с расчетом по модели невязкой несжимаемой жидкости

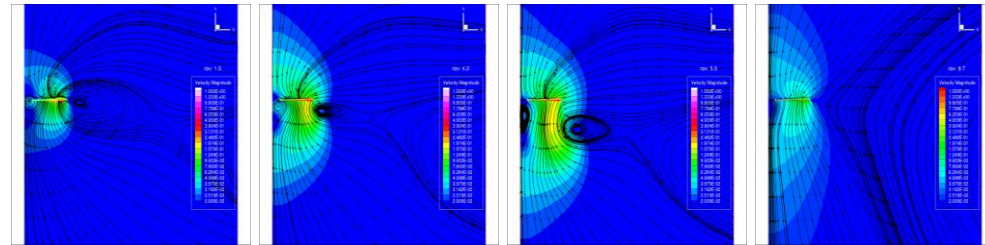
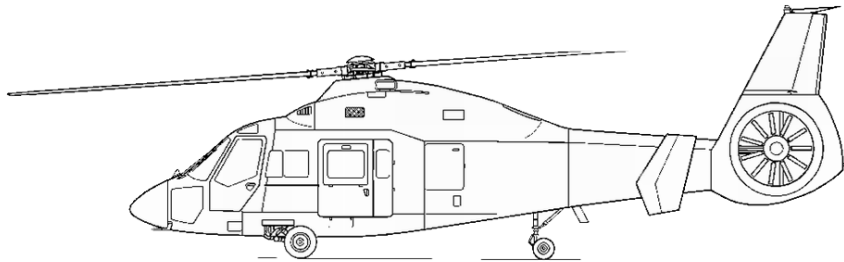


Изолинии избыточного давления
вблизи передней кромки профиля
без модификации(сверху) и с
модификацией (снизу)

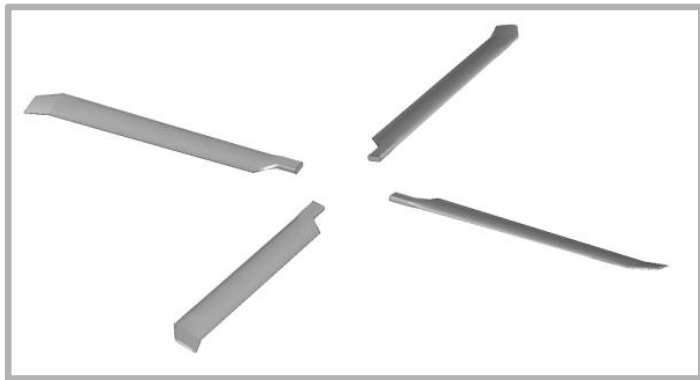
И.В. Абалакин, В.Г. Бобков, Т.К. Козубская, Разработка метода расчёта течений с малыми числами маха
на неструктурированных сетках в программном комплексе NOISEtte, Математическое моделирование, номер 4 или 5, 2017.

Расчеты за 2016 год

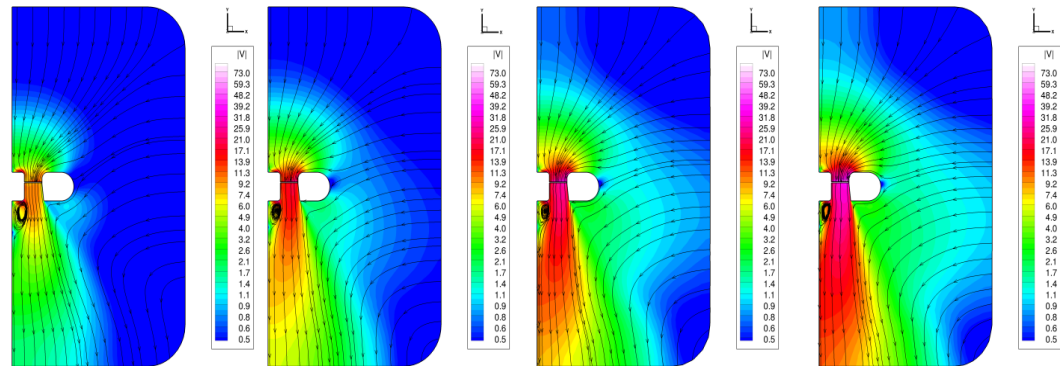
- Расчеты расчет аэродинамических и акустических характеристик несущего и рулевого винта вертолета



эволюция концевых вихря винта
модельного несущего винта

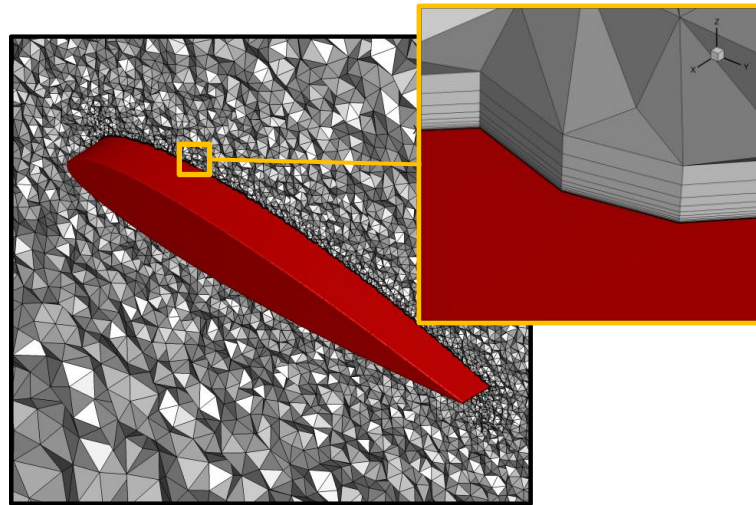
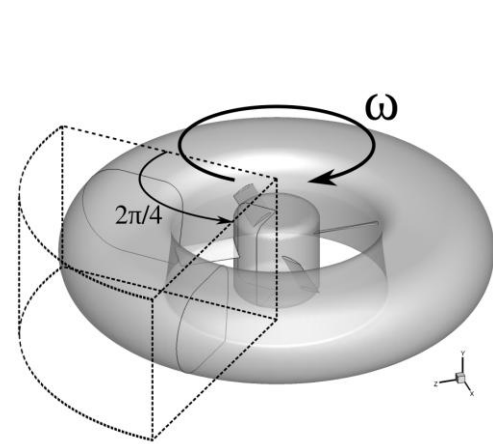


модельный несущий винт



мгновенные поля скорости при различных углах установки
лопастей конфигурации «винт в кольце»

Исследование аэродинамики и аэроакустики винта в кольце



Сетки до 6.4M узлов / 21M элементов

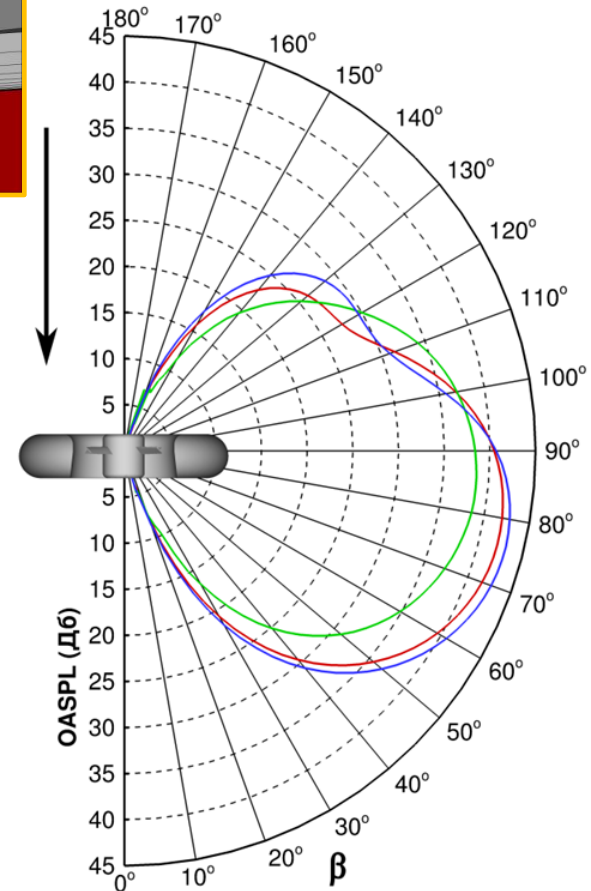
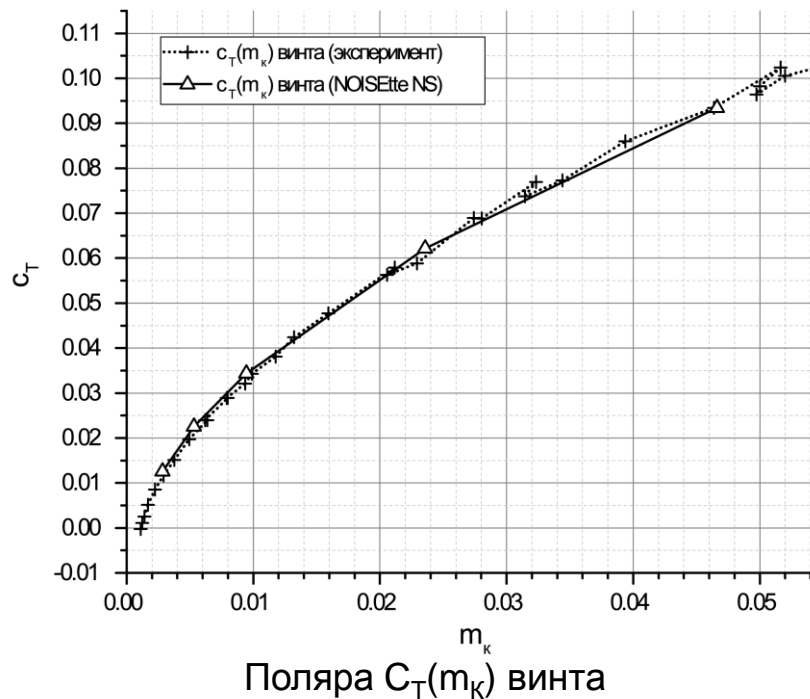
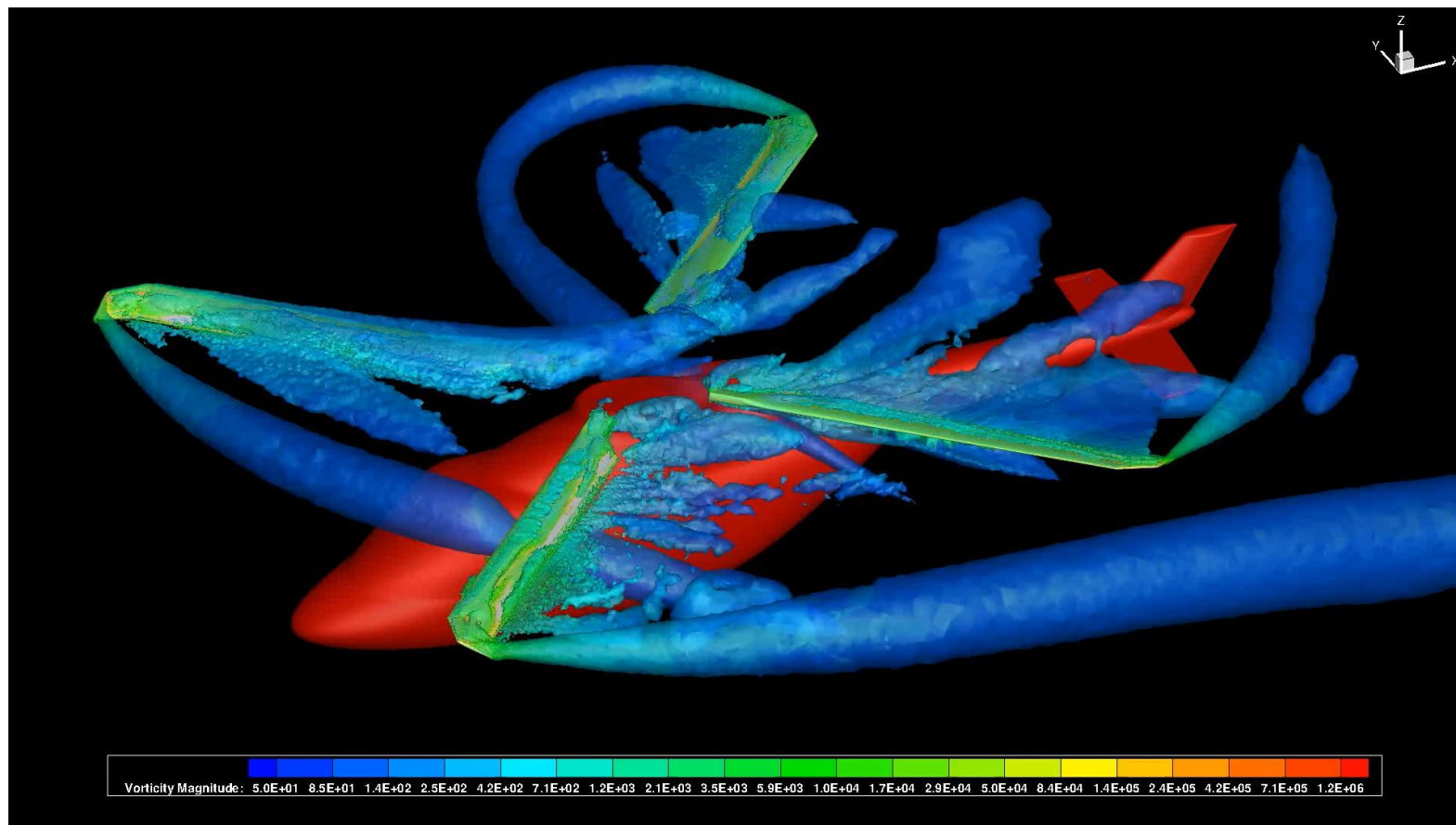


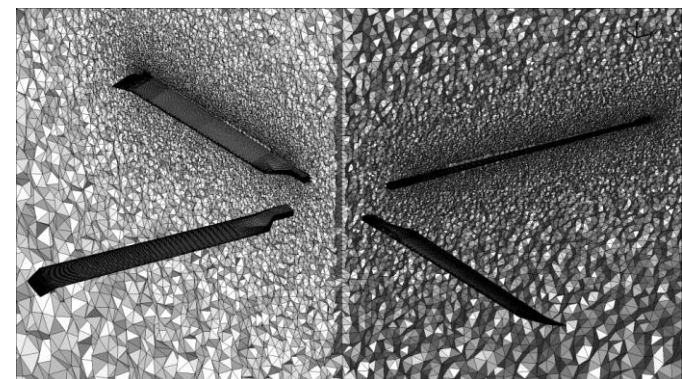
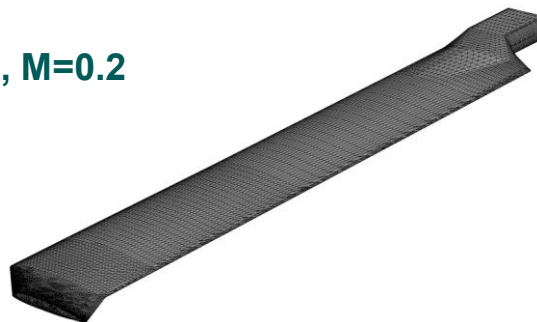
Диаграмма направленности,
угол установки лопасти 30°

Исследование аэродинамики несущего винта



**4-лопастной винт, $R = 1.95$ м,
хорда 0.18м, вращение 668 об/мин, $M=0.2$**

| Угол установки лопасти | Число узлов | Число элементов |
|------------------------------|----------------|--------------------|
| 10° | 2 833 910 | 12 212 904 |
| 10° | 4 917 414 | 24 436 612 |



Дозвуковая струя

Параметры течения:

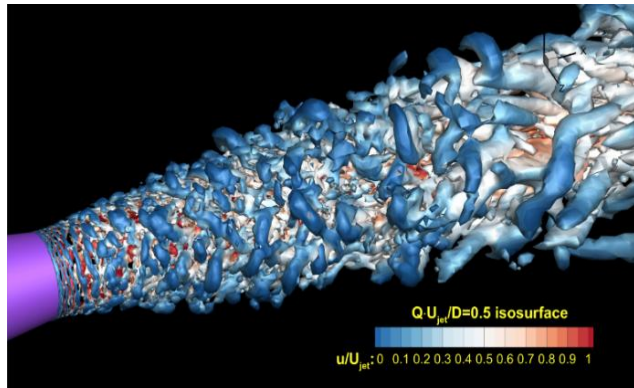
$$Re_D = 1.1 \cdot 10^6$$

$$M_{jet} = 0.9$$

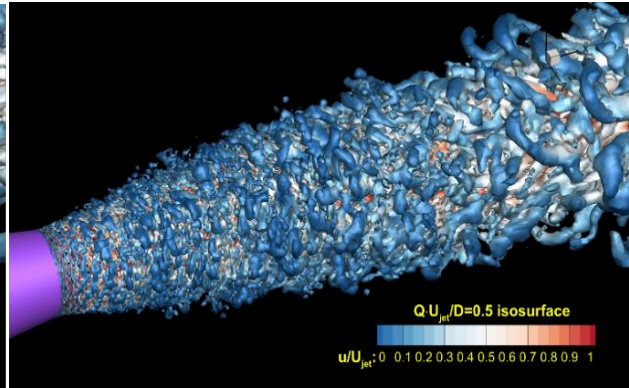
Параметры расчета:

- Сетки до 8.8 млн. узлов
- Одновременно задействовано 48-1024 ядер
- Суперкомпьютер: K100, Ломоносов

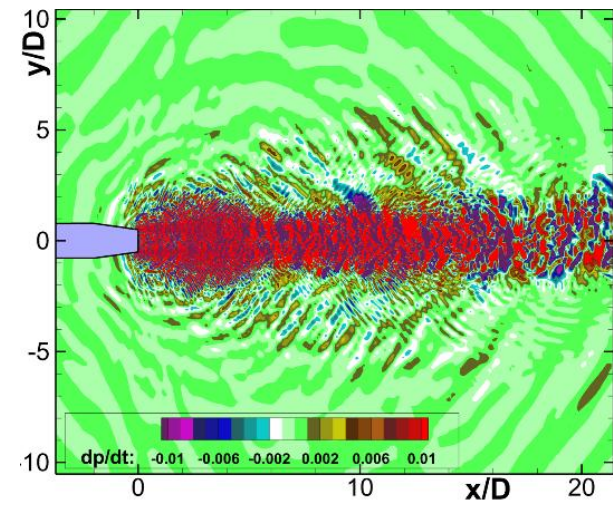
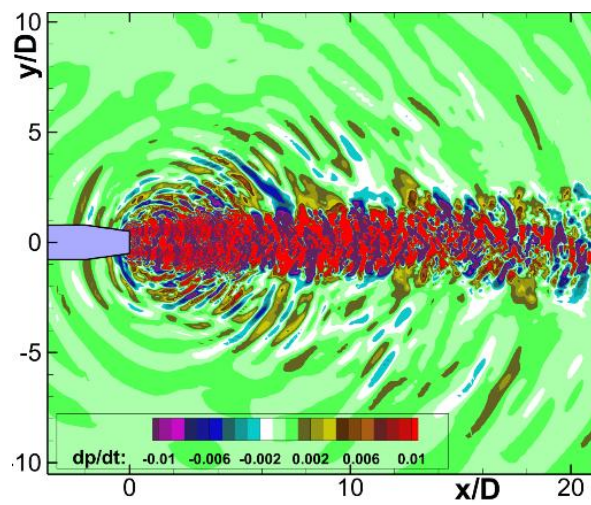
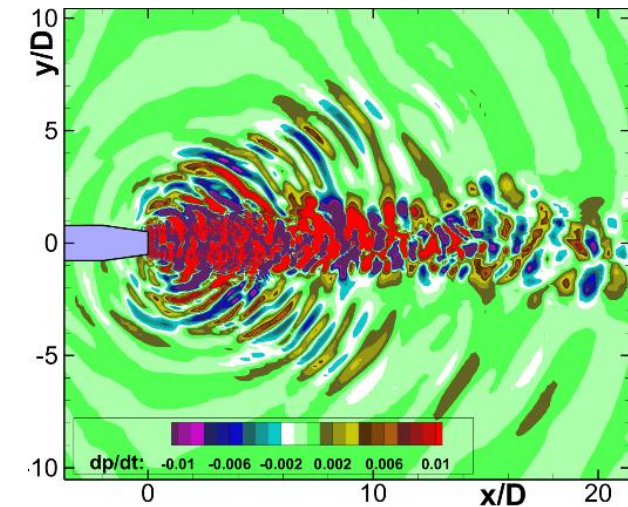
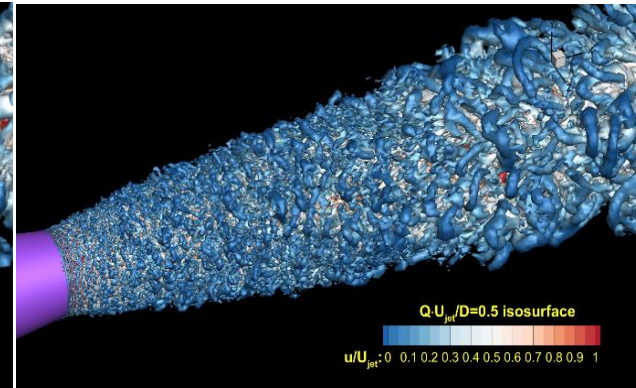
Сетка 1.5 млн:



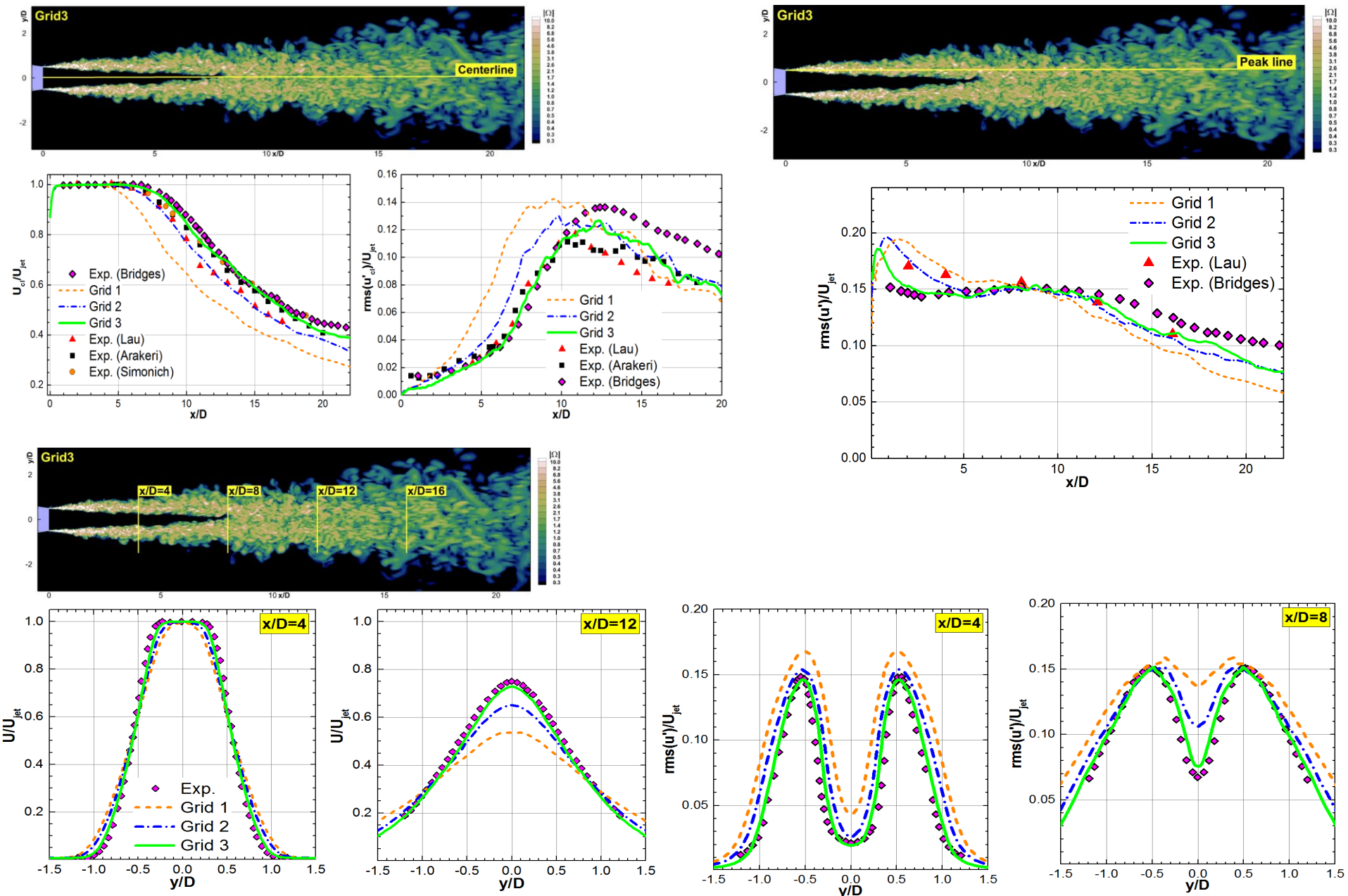
Сетка 4.1 млн:



Сетка 8.8 млн:



Дозвуковая струя: сравнение с экспериментом по аэродинамике



Дозвуковая струя

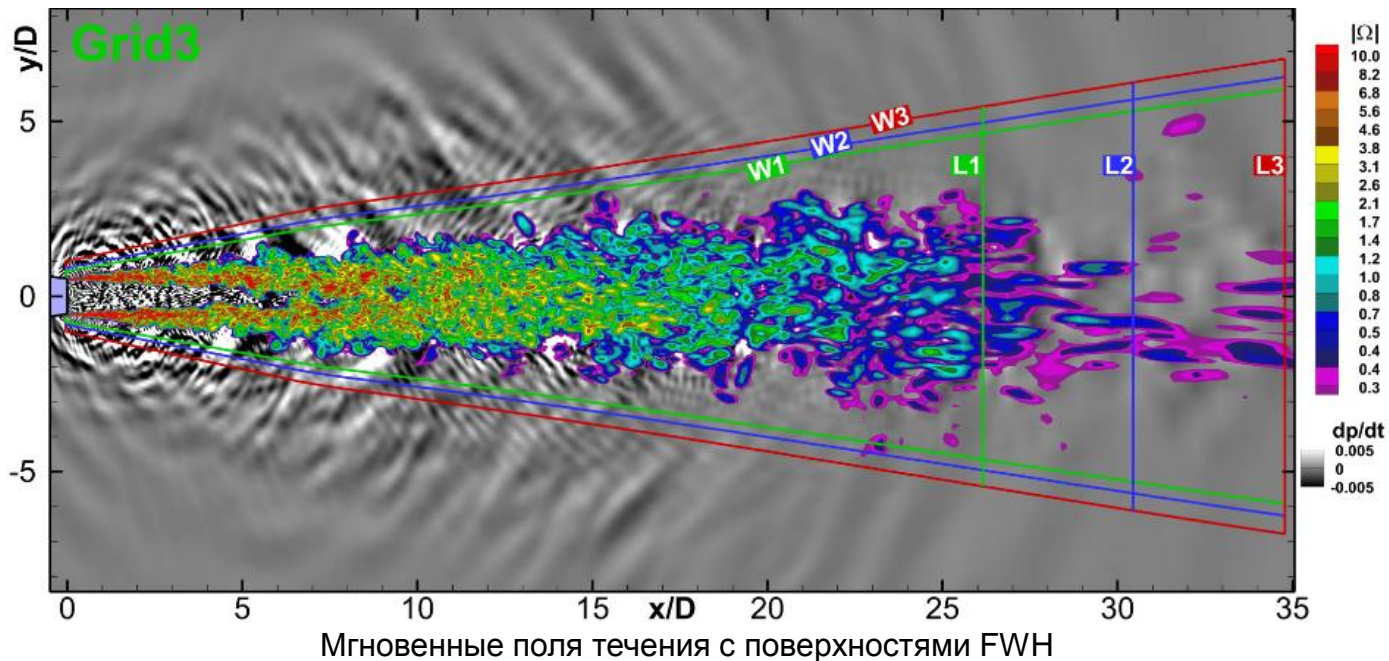
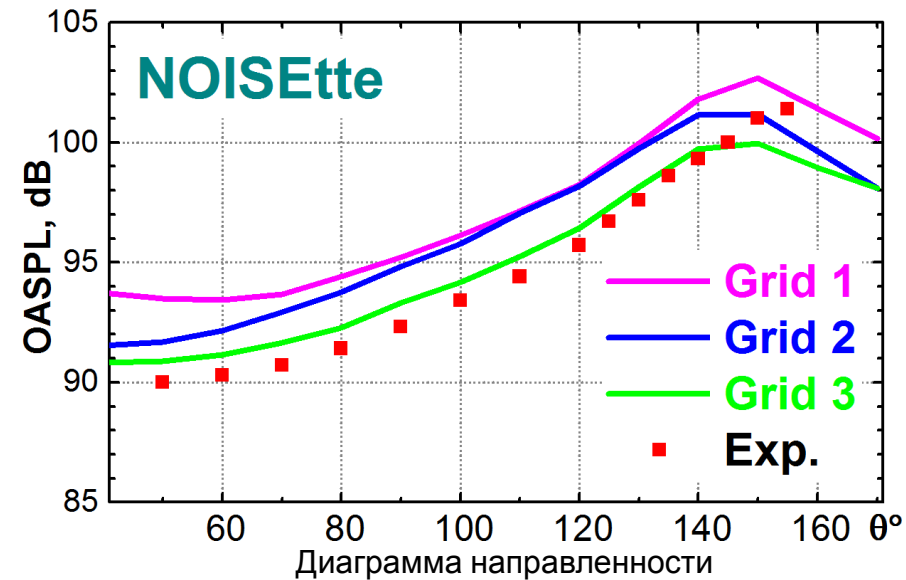
Аэроакустика

Цели:

Тестирование новой версии DDES [Shur et al, 2015]

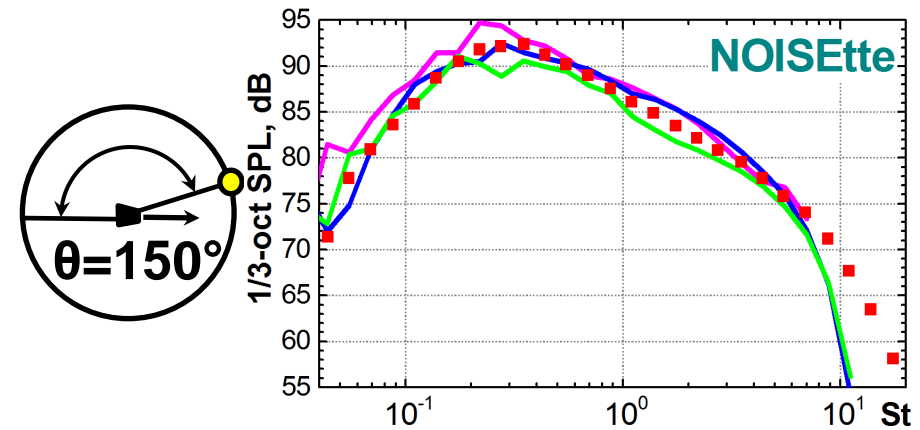
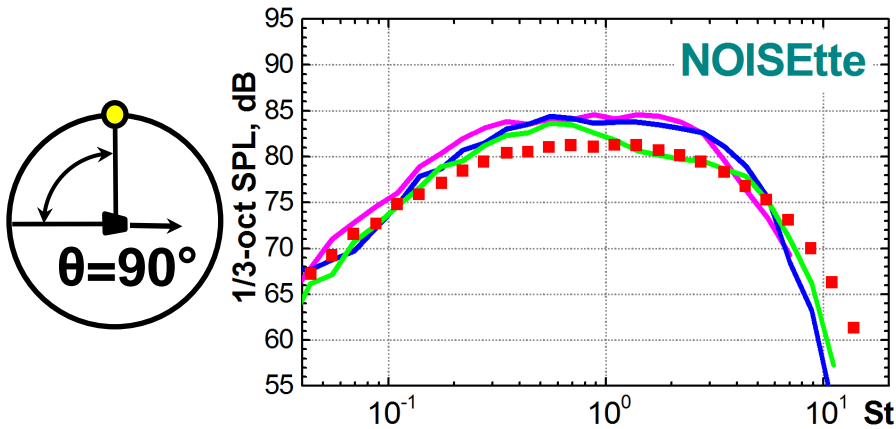
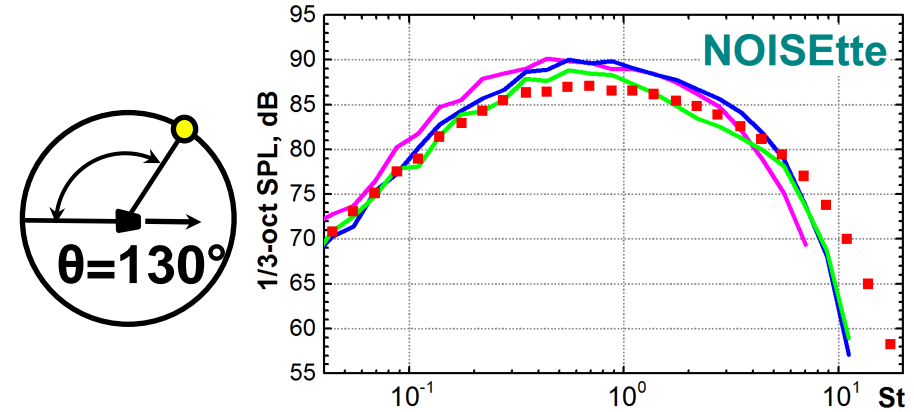
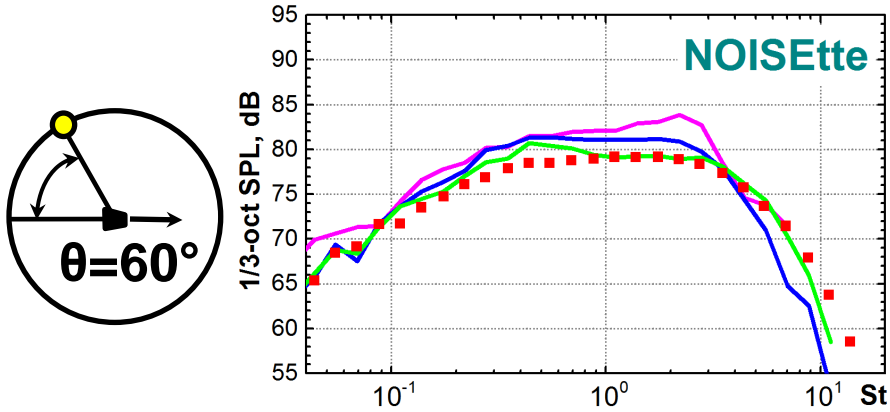
Доработка вычислительного алгоритма

Доработка акустического постпроцессора



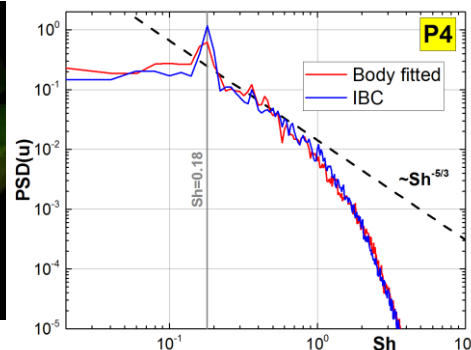
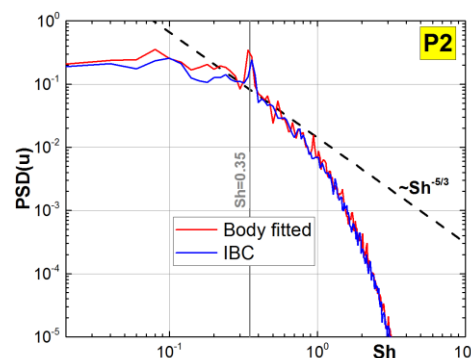
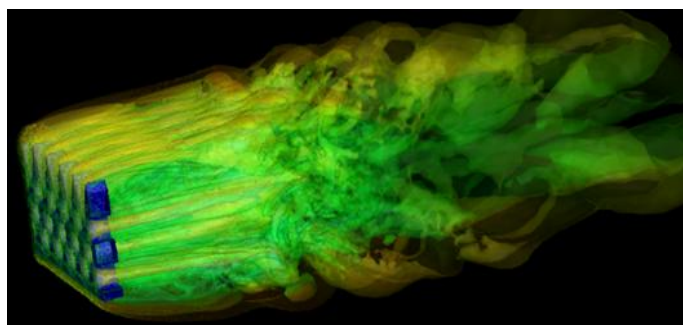
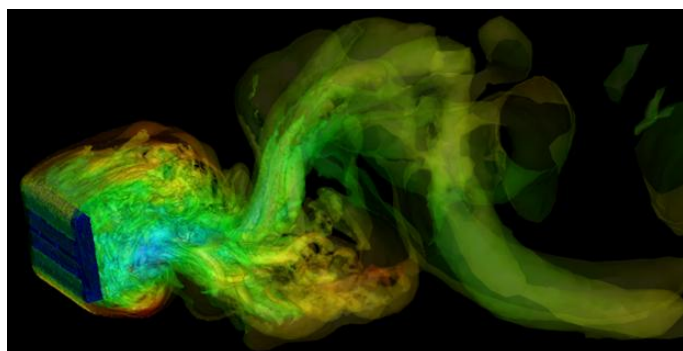
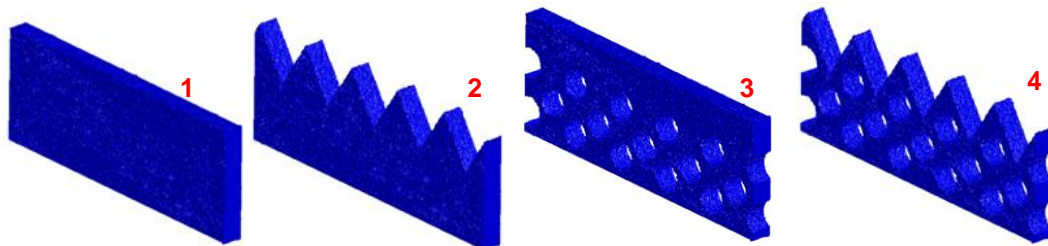
Дозвуковая струя: сравнение с экспериментом

- 1/3-октавные спектры в дальнем поле для разных позиций наблюдателя

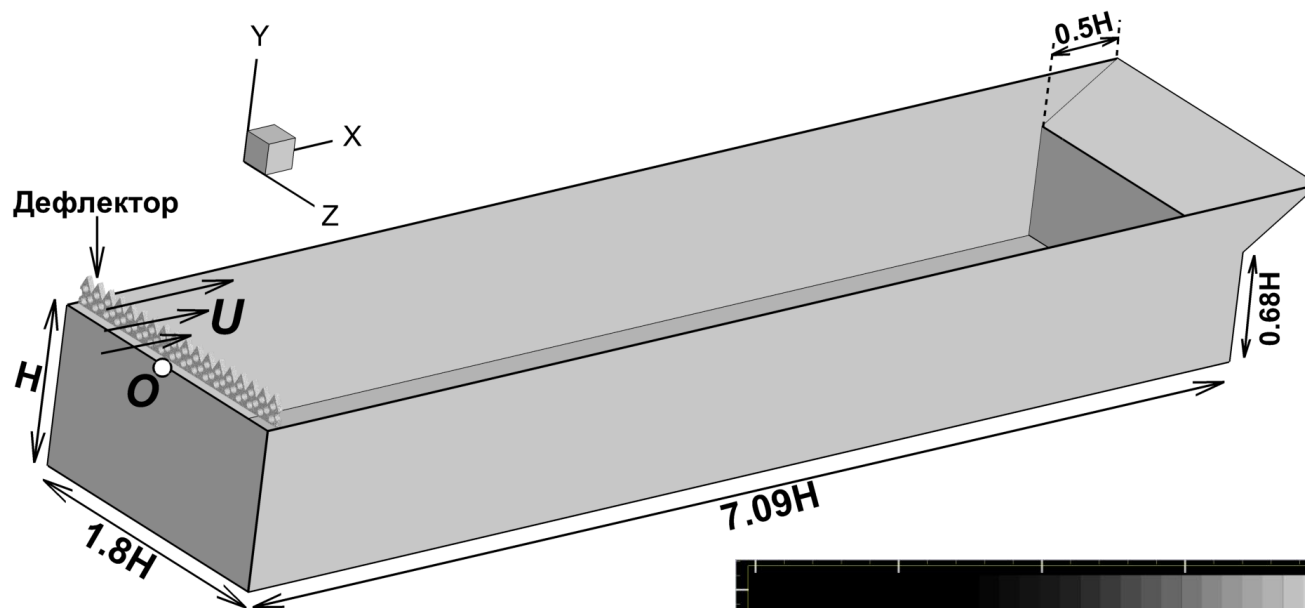


IBC: Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

- Моделирование дефлекторов в различных конфигурациях

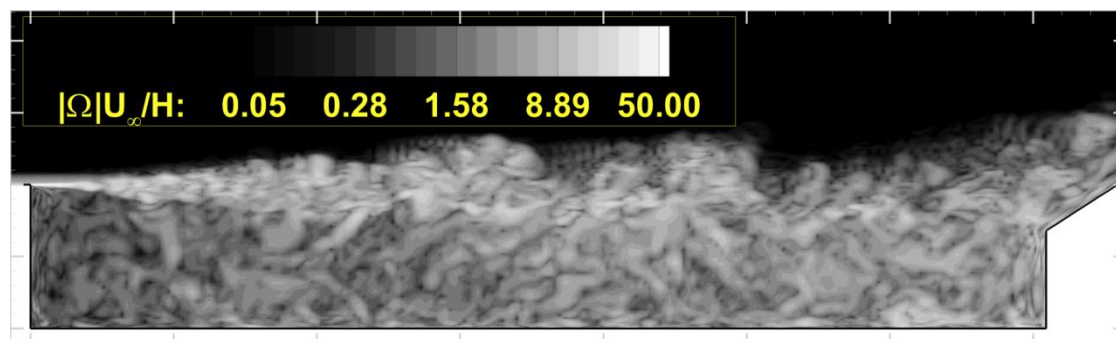


IBC: Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

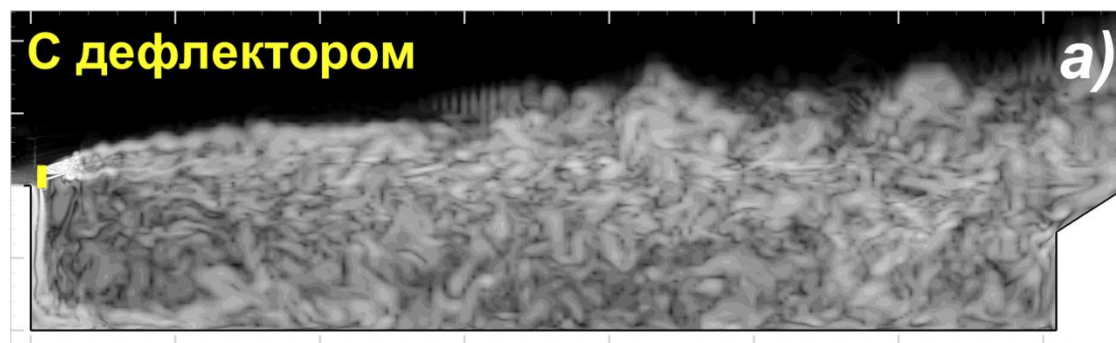


Параметры расчета

- $M=0.8$, $Re = 7$ млн
- сетки до 14 млн узлов

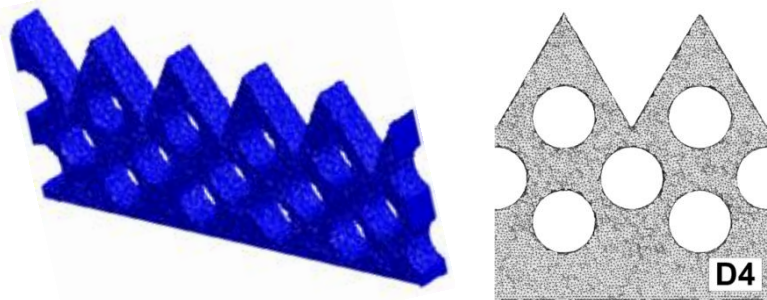


С дефлектором

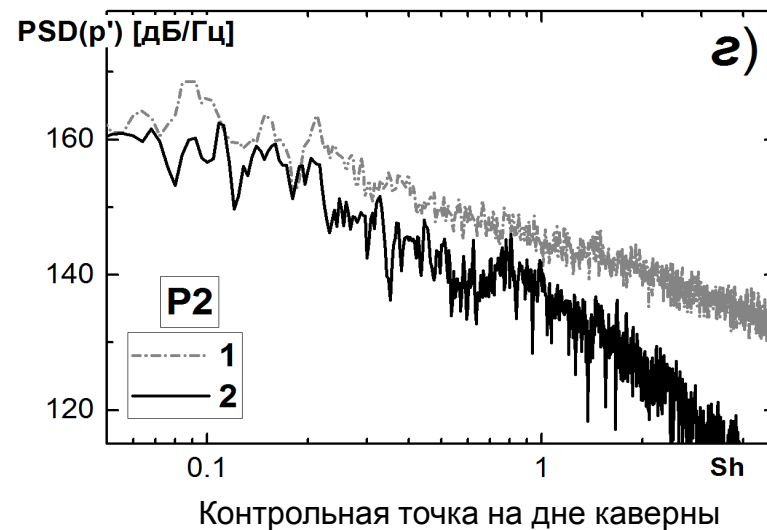
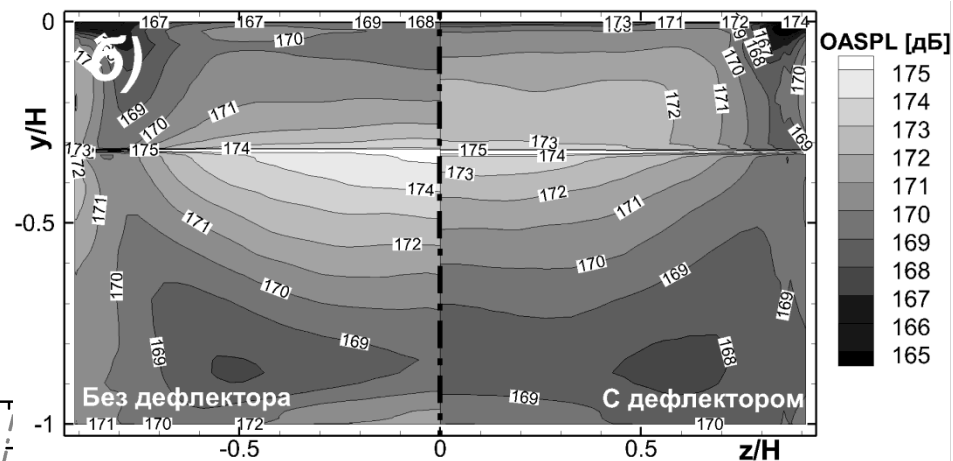
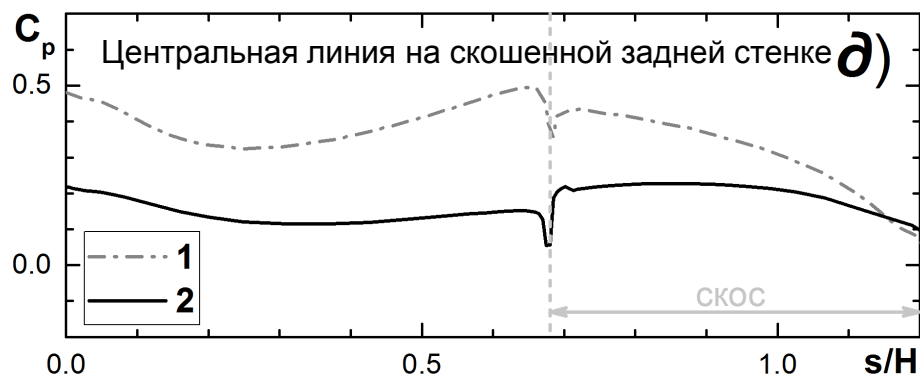
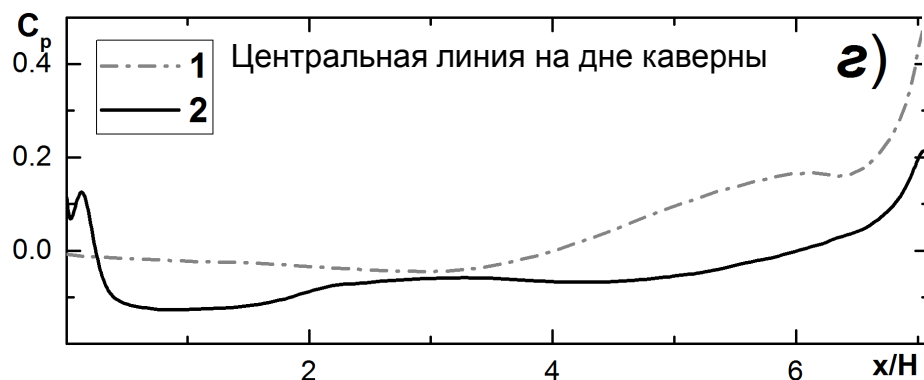


IBC: Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

Результаты для дефлектора 4



1 – без дефлектора, 2 – с дефлектором





Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

Отчуждаемость

NOISEtte – исследовательской код

**Проблемно-ориентированные решения
NOISEtte.rotor, NOISEtte.deflector**

Передача кода участникам совместной научной работы



Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

NOISEtte 2017...

**как мы доводили, отлаживали, разгребали то,
что понаделали в 2016, 2015... году**

Спасибо за внимание!