

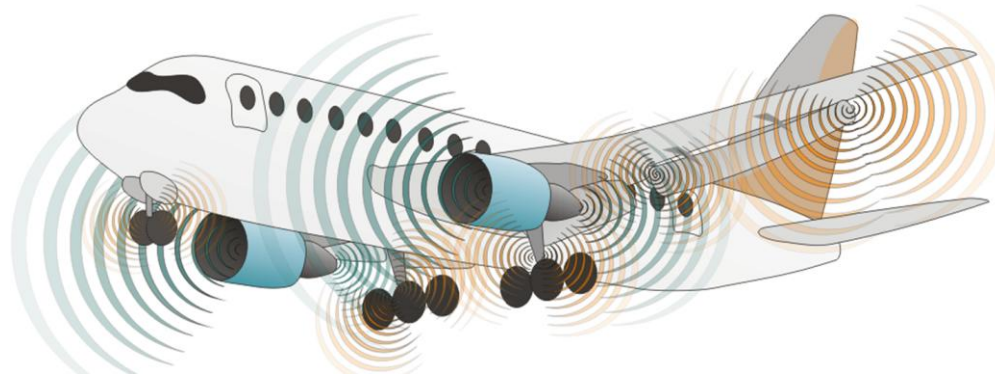
# Программный комплекс NOISETTE

Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений

Вычислительная аэродинамика и аэроакустика

Алгоритмы повышенной точности

Неструктурированные сетки



И. Абалакин, к. ф.-м. н., с.н.с.

П. Бахвалов, к. ф.-м. н., н.с.

В. Бобков, н.с.

А. Горобец, д. ф.-м. н., в.н.с.

А. Дубень, к. ф.-м. н., н.с.

Н. Жданова, к. ф.-м. н., н.с.

Т. Козубская, д. ф.-м. н., зав. сект.

С. Суков, к. ф.-м. н., с.н.с.

F.X. Trias, PhD



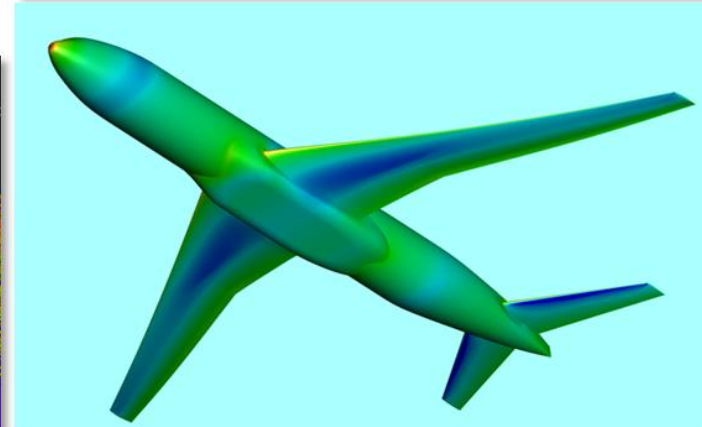
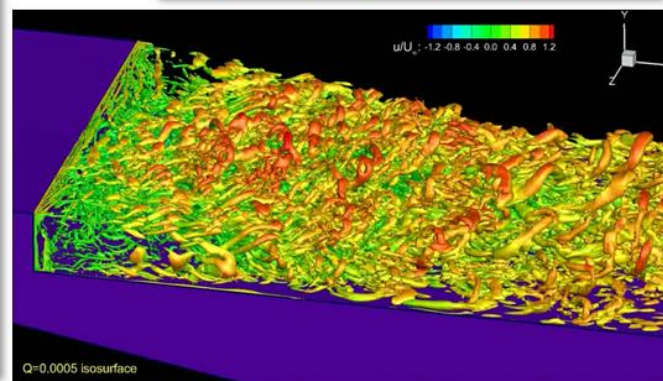
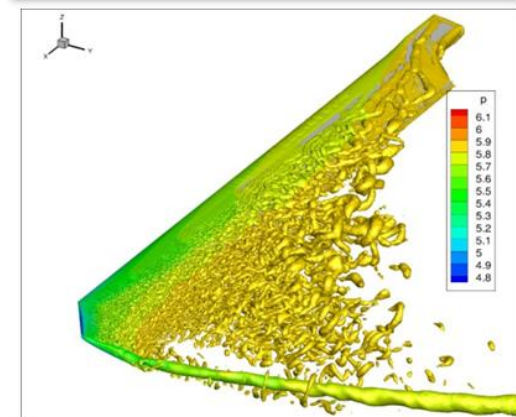
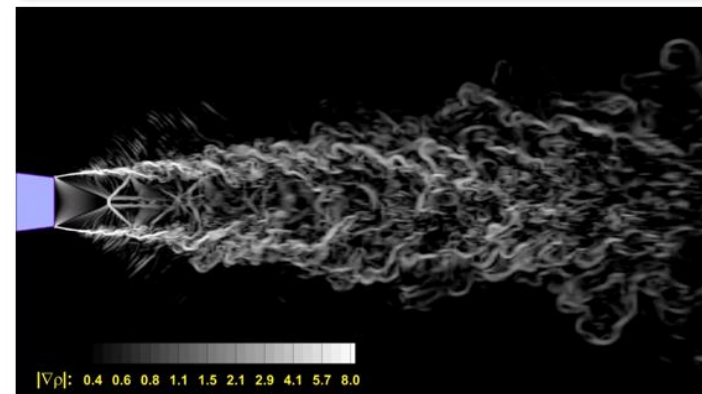
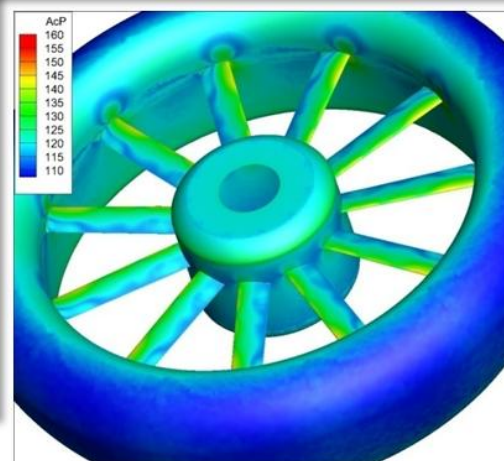
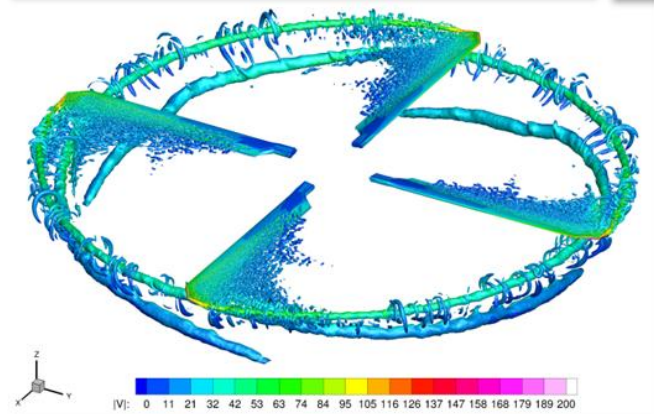
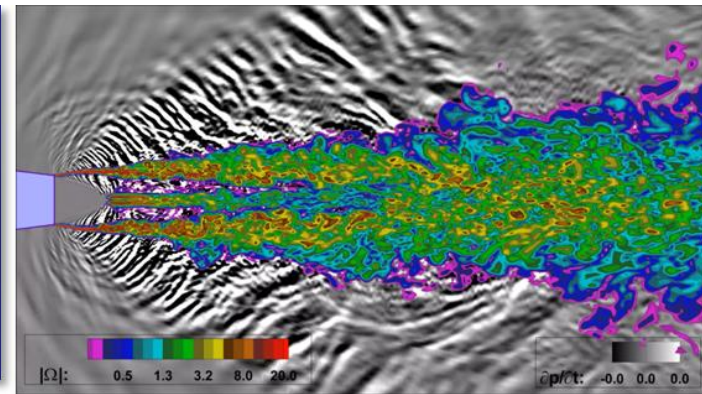
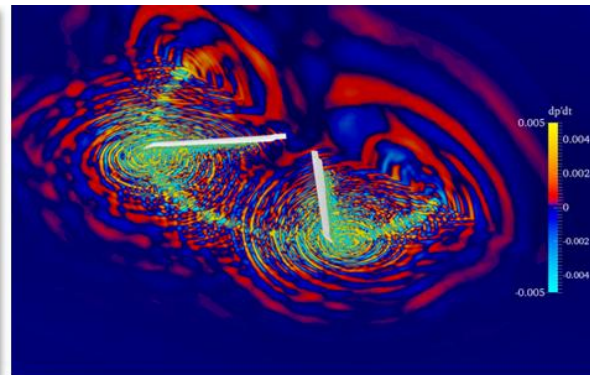
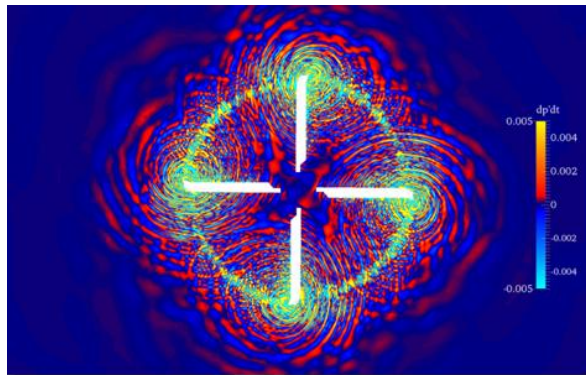
Сектор вычислительной аэроакустики

<http://caa.imamod.ru>

ИГМ им. М. В. Келдыша РАН

# Программный комплекс NOISETTE

## CFD и САА приложения



- **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  
 $\mathbf{F}_\nu$ ,  $\mathbf{G}_\nu$ ,  $\mathbf{H}_\nu$  – диссипативных,  $Re$  – число Рейнольдса.

- **Семейство моделей Эйлера**

- EE – полные уравнения Эйлера
- NSE – полные уравнения Навье-Стокса
- LEE – линеаризованные уравнения Эйлера

- **Модели турбулентности**

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

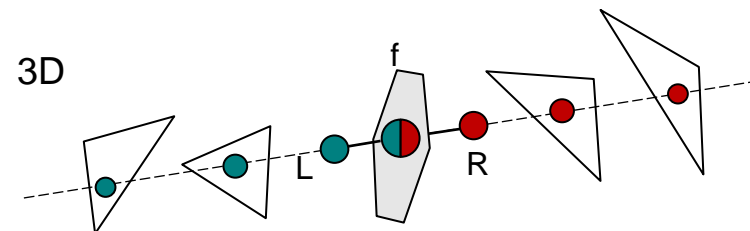
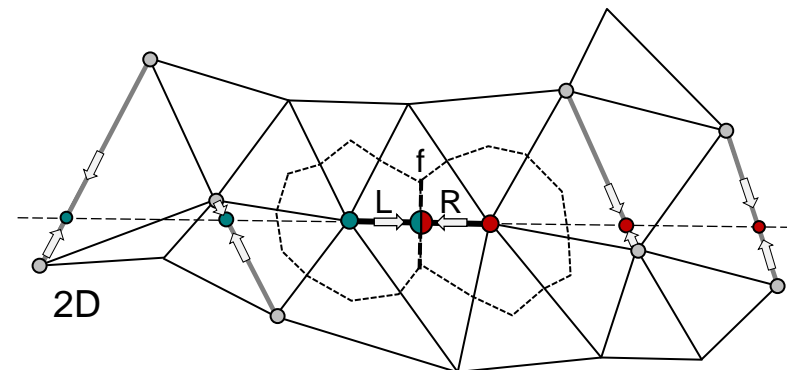
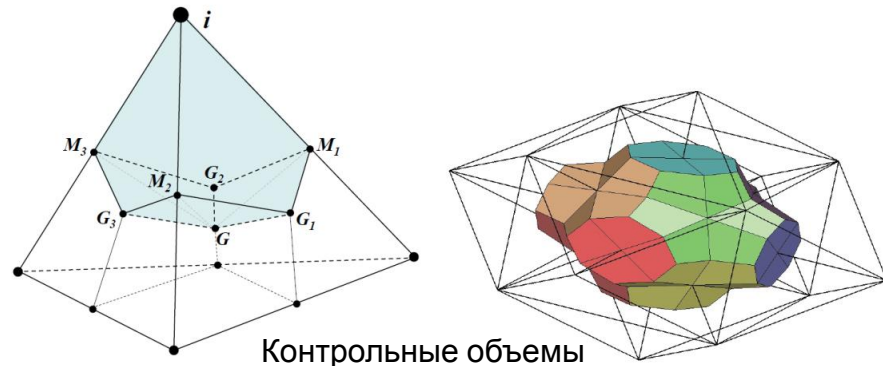
- **Погруженные граничные условия – IBC**

- **Метод расчета акустики в дальнем поле FW/H**

Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики  
Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

# Численные методы

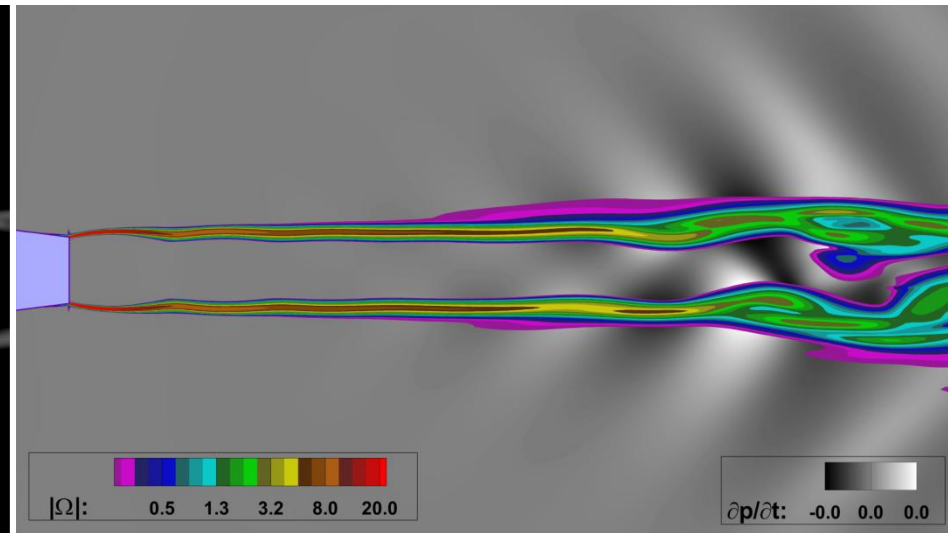
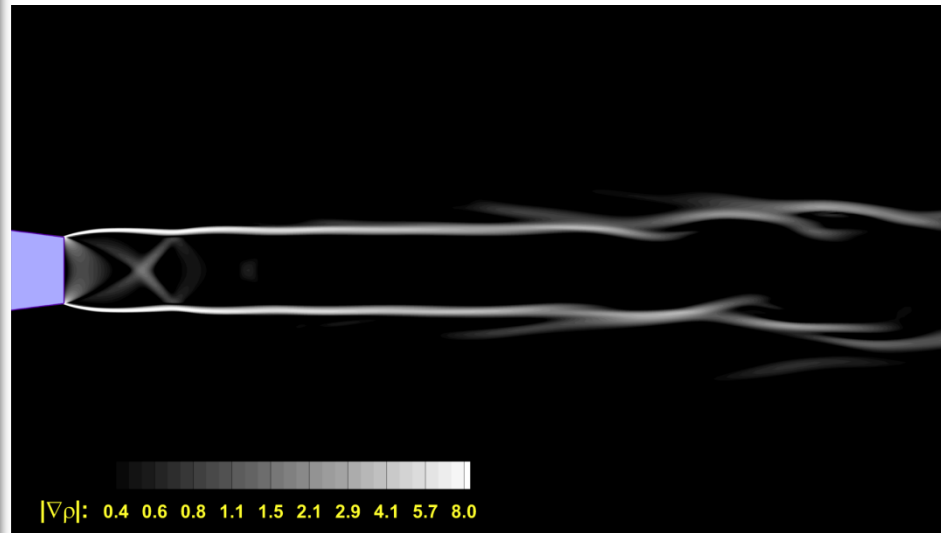
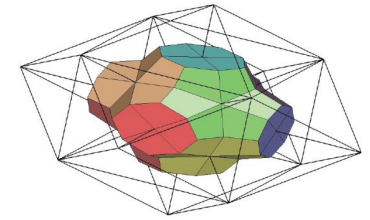
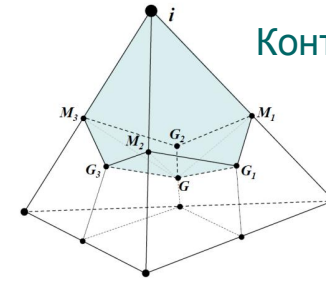
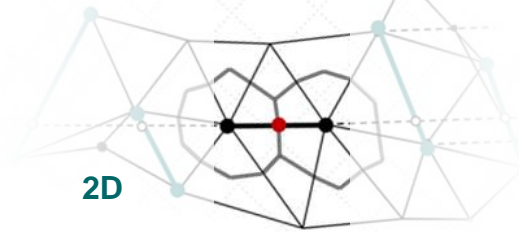
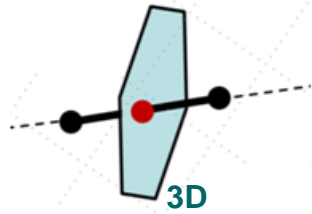
- **Неструктурированные сетки**  
Гибридные сетки (элементы до 6 граней)
- **Схемы повышенной точности**  
EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией
- **Римановские солверы:**  
Роу, Русанов, HLLC, HLLD, Годунов
- **Маломаховые течения**  
Предобуславливатель Туркеля
- **Разрывные решения**
  - WENO-EBR схемы
  - MUSCL-TVD EBR схемы
- **Интегрирование по времени**
  - Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
  - Неявная схема 1-2 порядка
- **Решатели СЛАУ**  
Предобусловленный BICG-Stab
- **Граничные условия**  
Твердые стенки, неотражающие, периодические, ...



Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики  
Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

# Почему важна точность схемы

## Базовая схема расчета потока через грань ячейки

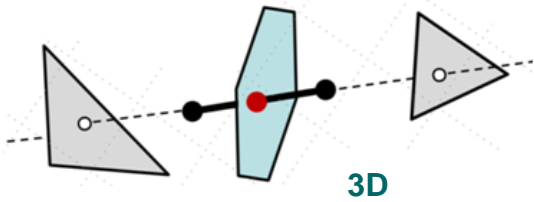


Сетка 5.5M узлов.

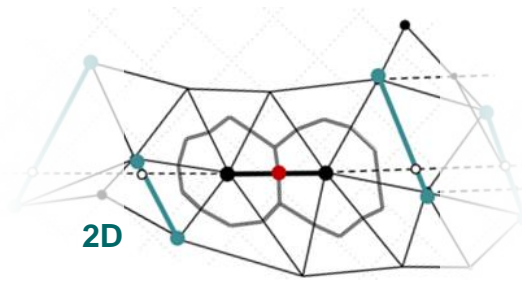
$M=1.54$ ,  $Re=1.3E6$ ,  $NPR=3.86$ ,  $NTR=2.97$ ,  $M_a=2.18$ ,  $U_{jet}=748.4$  m/s,

# Почему важна точность схемы

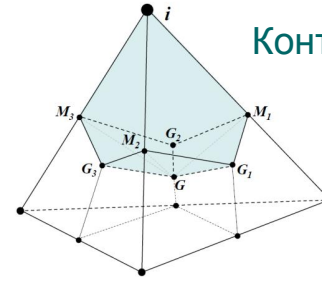
## Схема EBR3-WENO



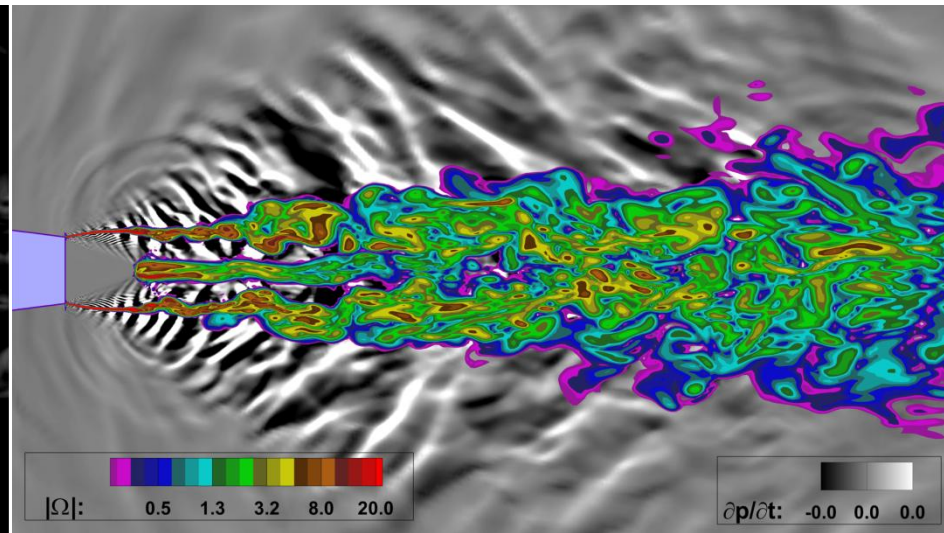
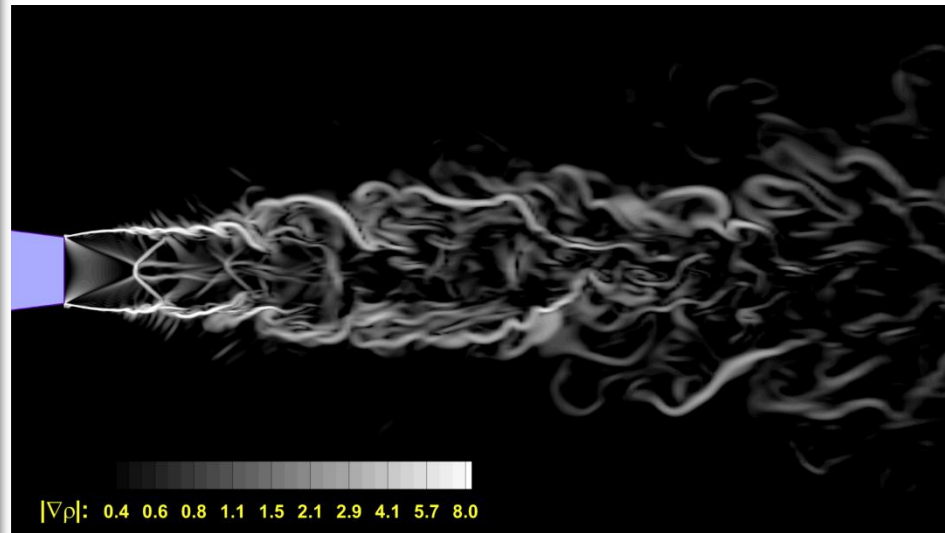
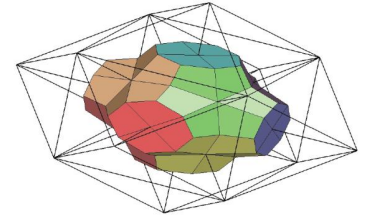
3D



2D



Контрольный объем

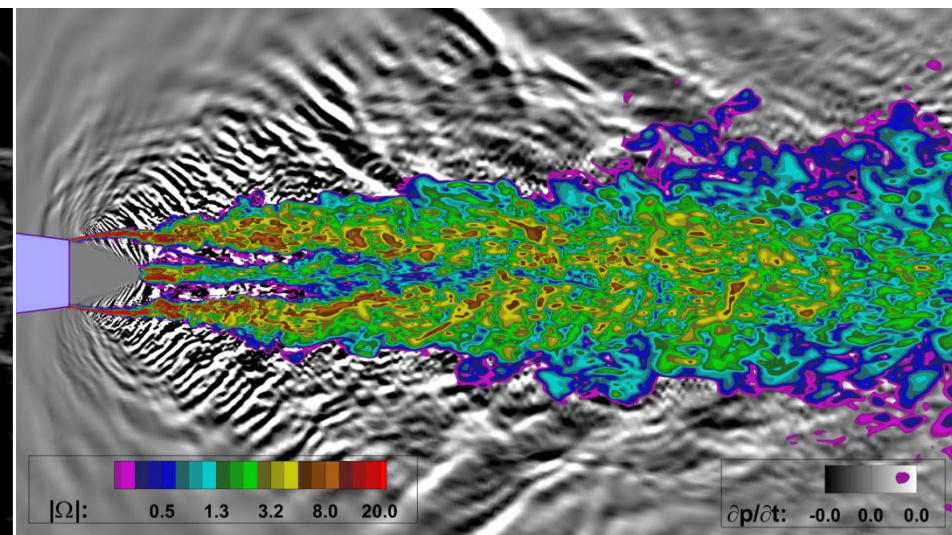
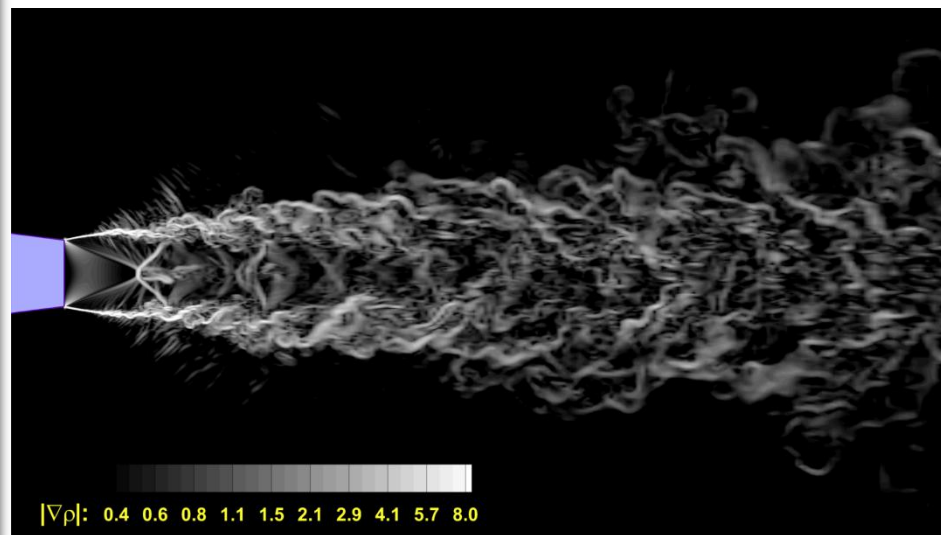
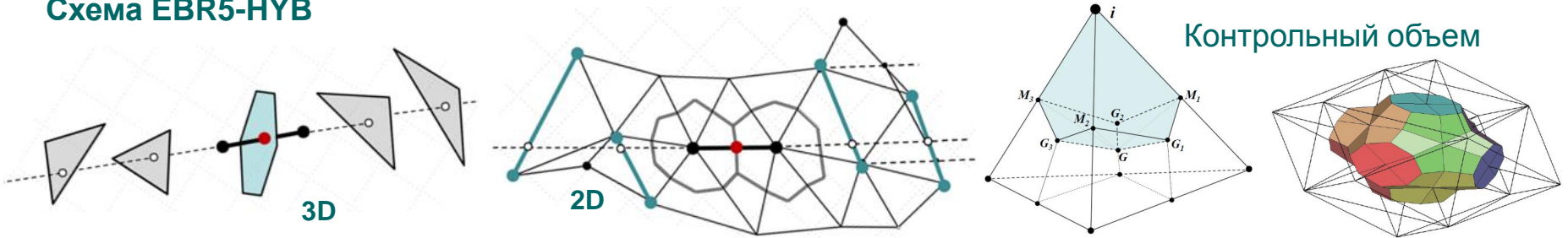


Сетка 5.5M узлов.

$M=1.54$ ,  $Re=1.3E6$ ,  $NPR=3.86$ ,  $NTR=2.97$ ,  $M_a=2.18$ ,  $U_{jet}=748.4$  m/s,

# Почему важна точность схемы

## Схема EBR5-HYB



Сетка 5.5M узлов.

$M=1.54$ ,  $Re=1.3E6$ ,  $NPR=3.86$ ,  $NTR=2.97$ ,  $M_a=2.18$ ,  $U_{jet}=748.4$  m/s,

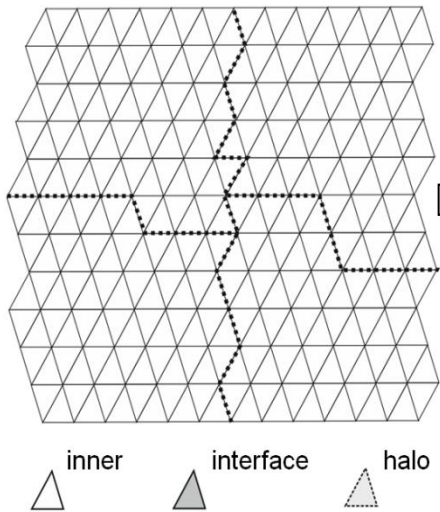
- **Многоуровневое распараллеливание MPI+OpenMP** для систем с числом ядер более 100000
- **Существенно-многопоточное распараллеливание с общей памятью на сотни нитей**
- **Полная адаптация алгоритма к потоковой обработке**  
совместимость с массивно-параллельными ускорителями.
- **Параллельная инфраструктура пре- и постпроцессора**  
распределенная обработка данных сверхбольшого объема,  
неструктурированные сетки с числом элементов более миллиарда.
- **Встроенные средства:**  
инструментальное профилирование, менеджер памяти, контроль стека, счетчик производительности



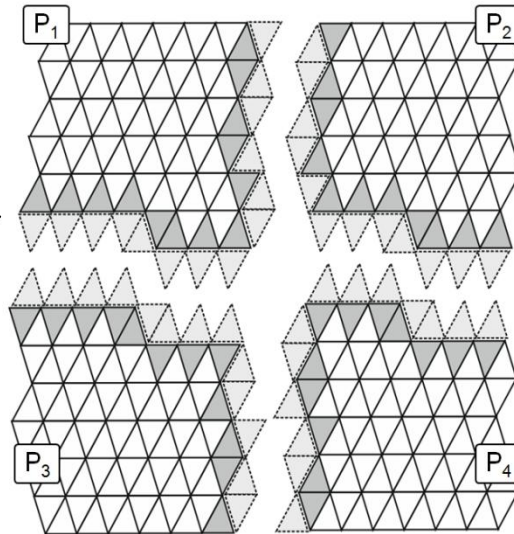


## Многоуровневая декомпозиция

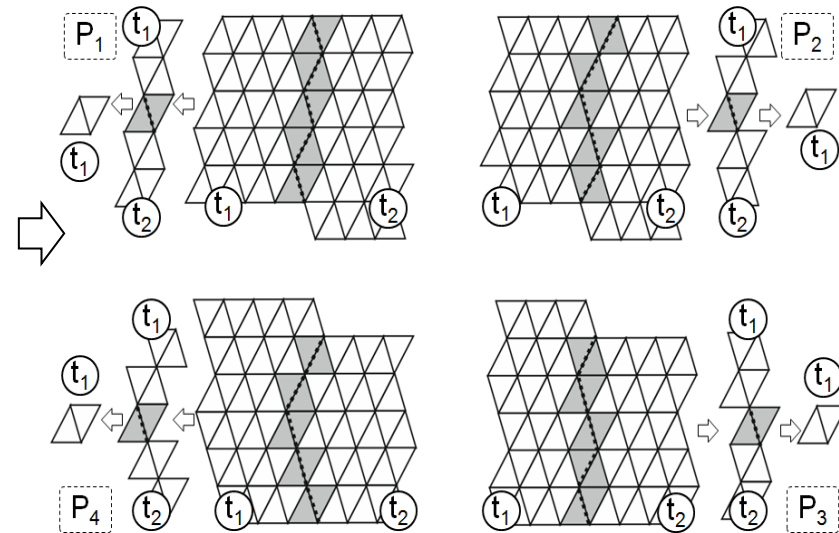
Расчетная область



Декомпозиция по MPI процессам



Декомпозиция по OpenMP нитям

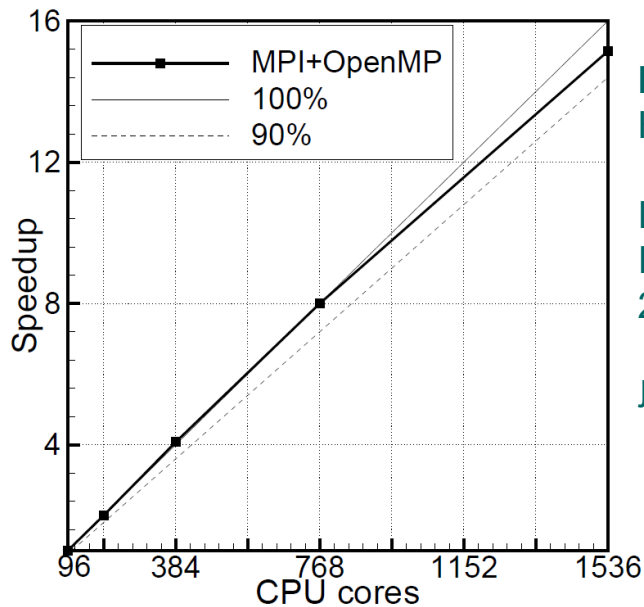
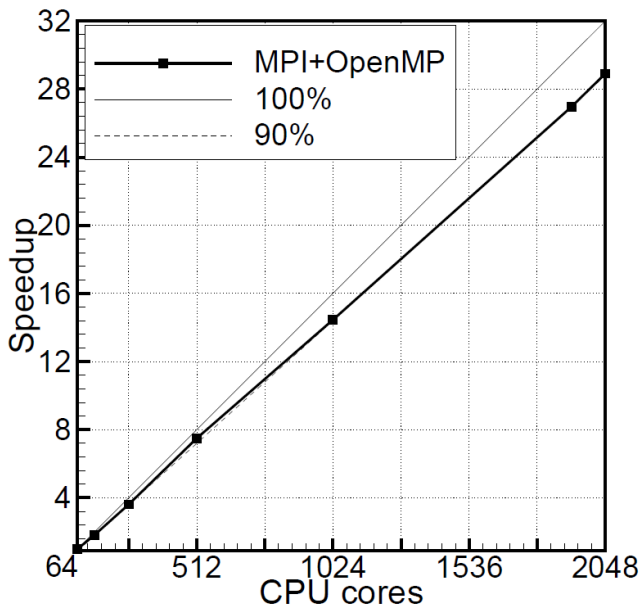


# Параллельные технологии

**MVS-10P**  
MCЦ РАН

EBR  
IDDES  
13M узлов

BFS



**HPC4**  
КИ

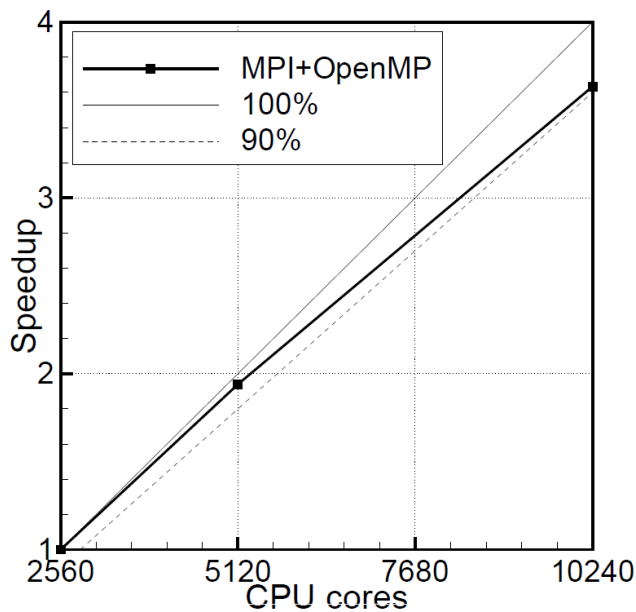
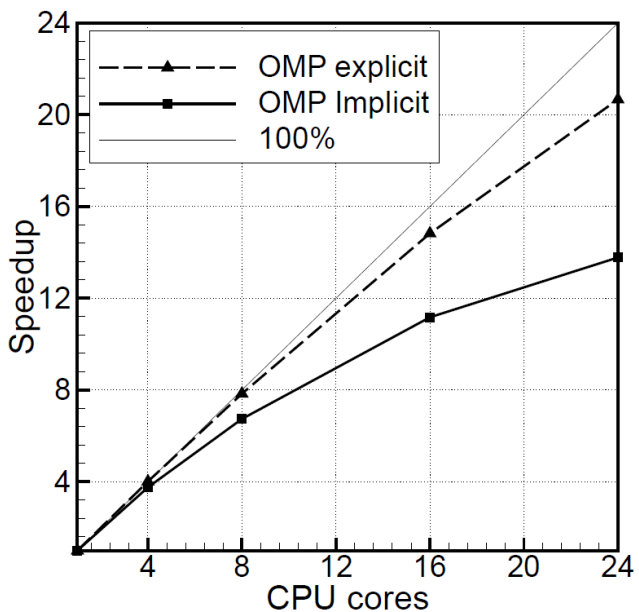
EBR  
IDDES  
22M узлов

Лопасть HB

**Marenostum**  
BSC

EBR  
IDDES  
1.6M узлов

Струя



**Ломоносов**  
МГУ

EBR  
DES  
160M узлов

Каверна

Слишком много схем, методов, подходов, ...

Слишком быстро все изменяется, внедряется, дополняется, ...

- Высокая трудоемкость разработки и поддержки переносимой гетерогенной реализации
- Очень сложно поддерживать актуальную документацию
- Усложнение структуры кода и работы разработчика
- Усложнение использования с точки зрения пользователя

В 2017 году выпилены из кода ...

Главный разработчик **Суков Сергей Александрович**, к.ф.-м.н., с.н.с.

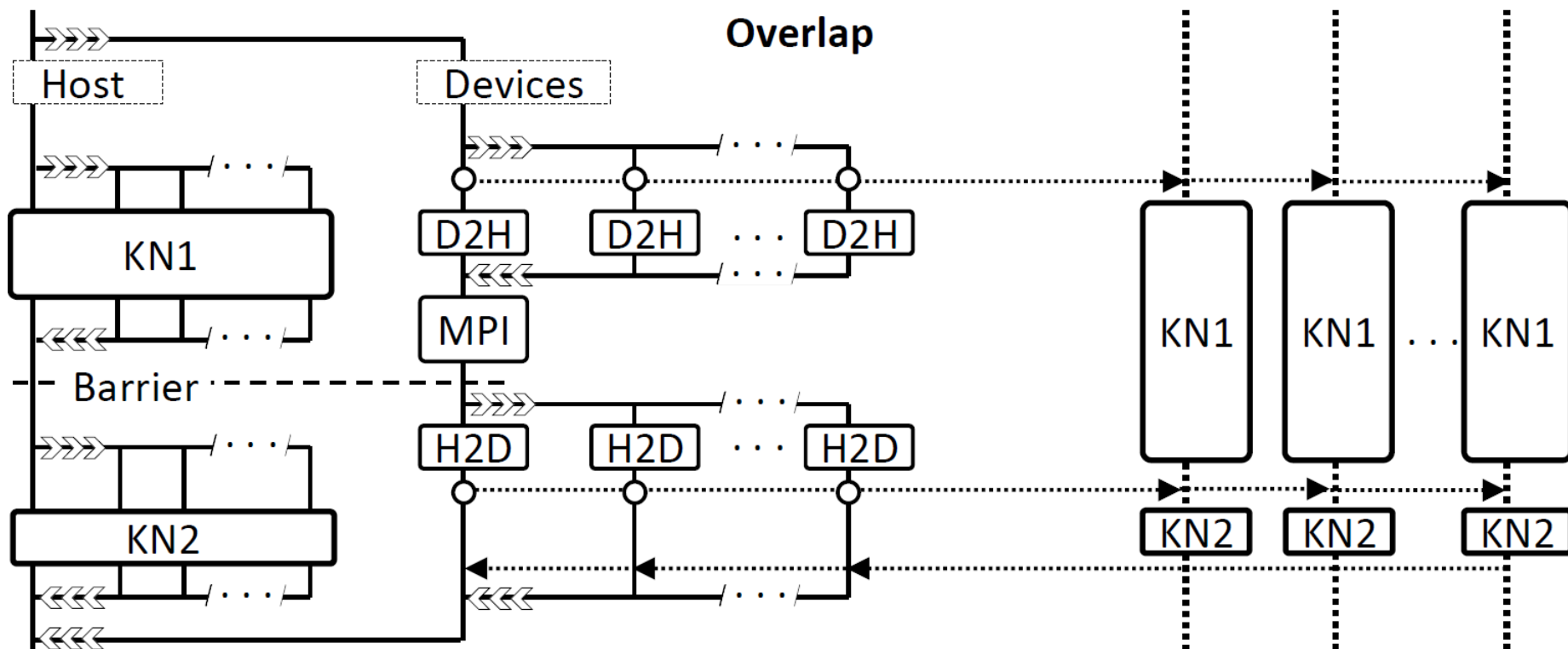
- **Сжимаемые уравнения Навье – Стокса**
- **Конечно-объемный метод на неструктурированных гибридных сетках с определением переменных в сеточных элементах**
- **Реконструкция линейными полиномами**
- **Набор солверов распада разрыва: Роу, Русанов, HLLC, HLLS, ...**
- **MPI + OpenMP + OpenCL распараллеливание**
  - полная переносимость
  - сокрытие обменов (overlap)
  - автонастройка рабочих групп
  - балансировка загрузки
  - RCM оптимизация нумерации
  - гетерогенный режим вычислений



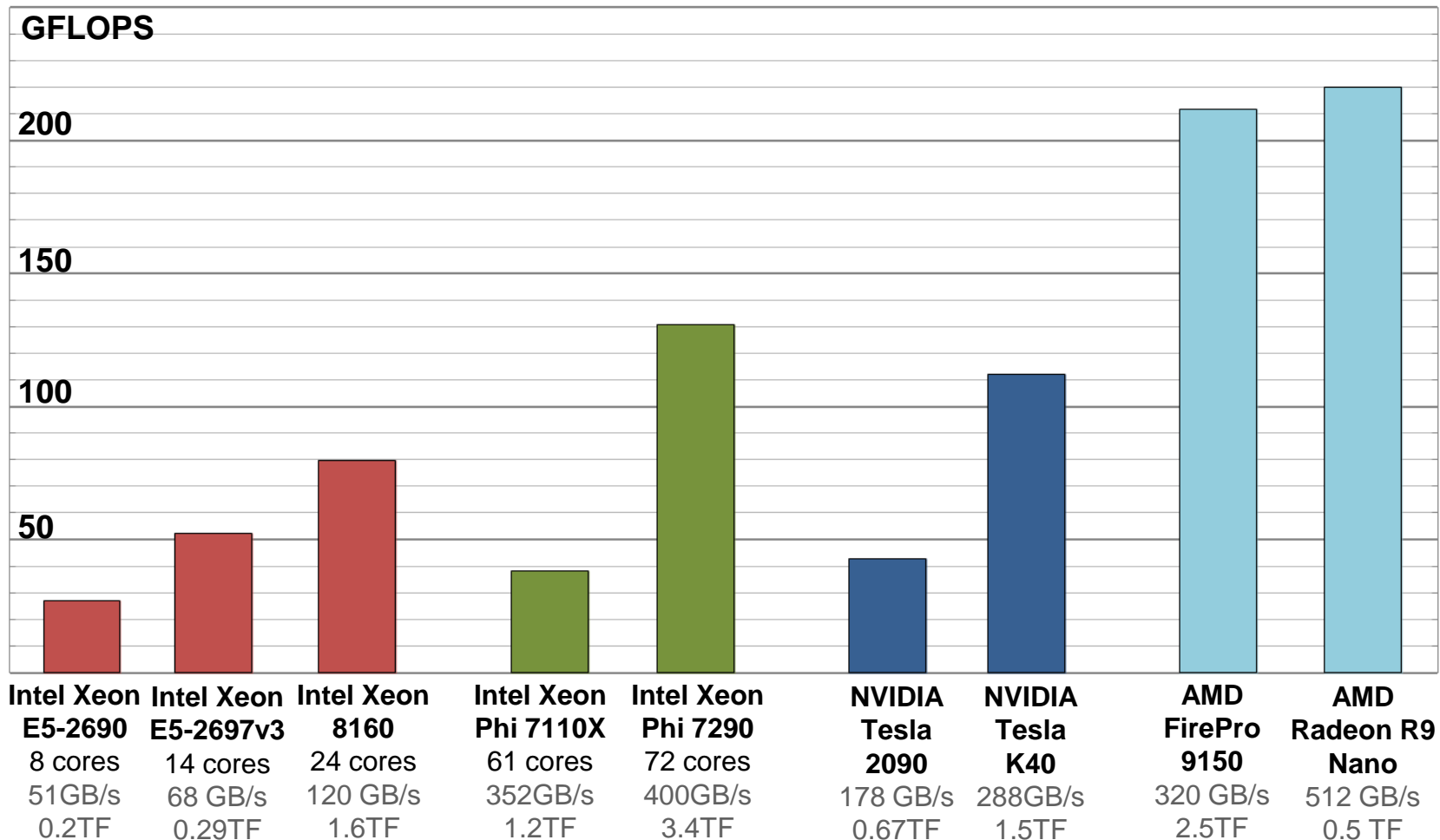
Суков С. А., Горобец А. В., Богданов П. Б. "Переносимое решение для моделирования сжимаемых течений на всех существующих гибридных суперкомпьютерах"  
Математическое моделирование, 2017 год, том 29, номер 8, стр.

- MPI + OpenMP + OpenCL распараллеливание

$$t_{over} = \max(t_{HD} + t_{MPI}, \max(N_L^{d_k})C_D) + \max(N_I^{d_k})C_D$$



# Сравнение производительности



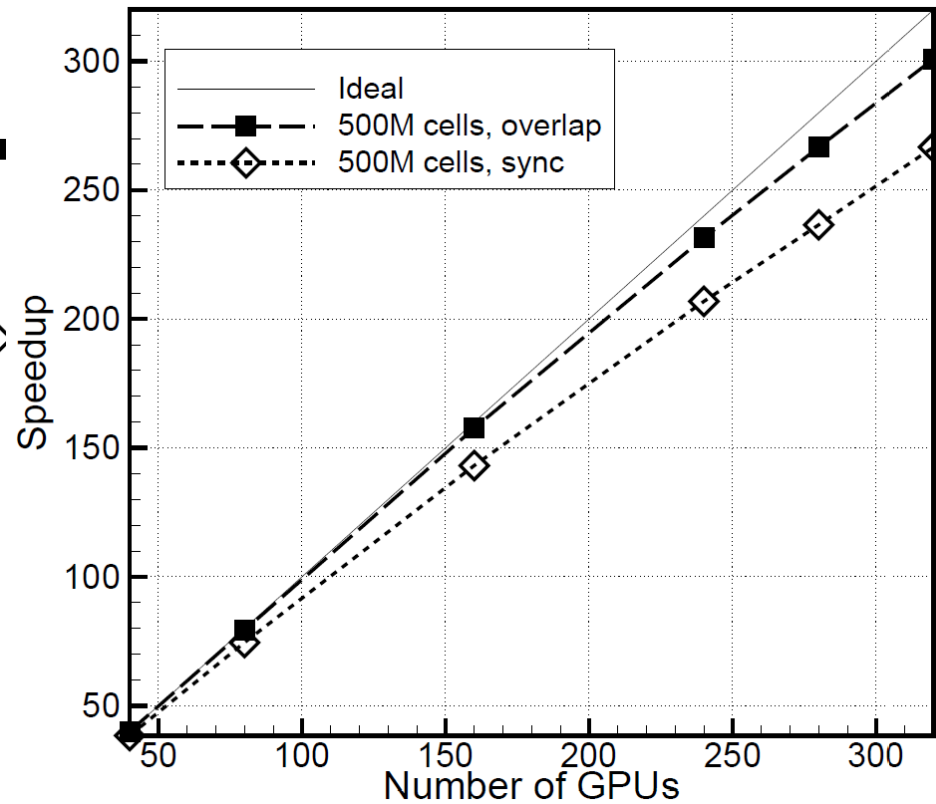
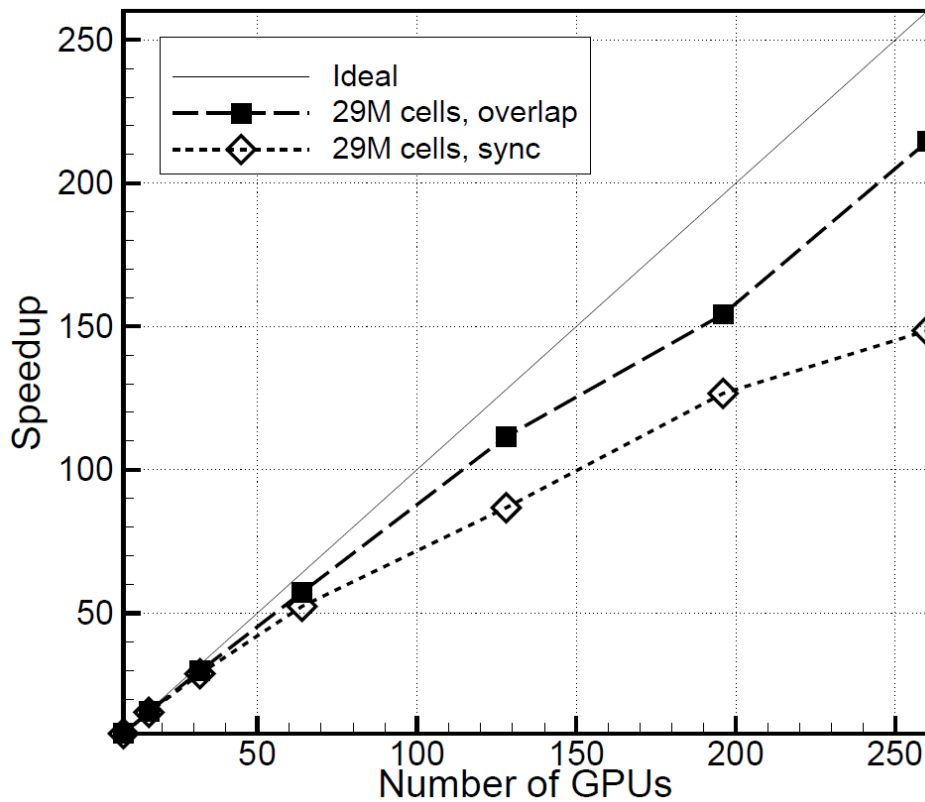
# Мульти-GPU на гибридном суперкомпьютере

## Lomonosov-2:

14C Xeon E5-2697v3  
NVIDIA K40, IB FDR  
29M cells

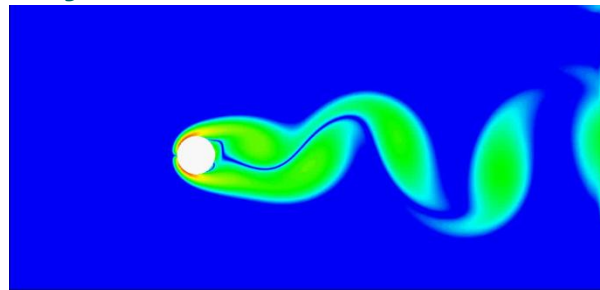
## HPC5:

2x 8C Xeon E5-2650v2,  
2x NVIDIA K80, IB FDR  
500M cells



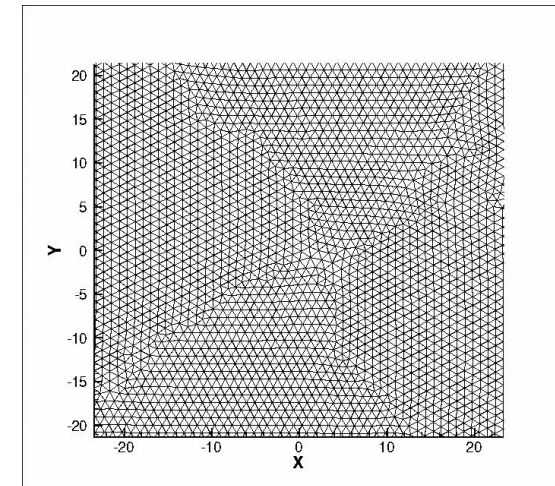
- **IBC – погруженные граничные условия**

движение тел под действием аэродинамических сил



- **Динамическая адаптация сетки**

движение узлов без изменения топологии для IBC



- **Стохастические модели синтетической турбулентности**

- **Гибридная трехкомпонентная схема EBR(WENO) + EBR(CD) + EBR(UW)**

Duben A., Kozubskaya T. "Jet Noise Simulation Using Ouasi-1D Schemes on Unstructured Meshes" 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017. AIAA 2017-3856 DOI:10.2514/6.2017-3856

- **Новый метод расчета подсеточного масштаба**

F.X.Trias, A.Gorobets, M.H.Silvis, R.W.C.P.Verstappen, and A.Oliva.

"A new subgrid characteristic length for turbulence simulations on anisotropic grids".

Physics of Fluids 29, 115109 (2017); DOI: 10.1063/1.5012546

- **Расчистка кода, переделка подсистемы выдачи результатов, ...**



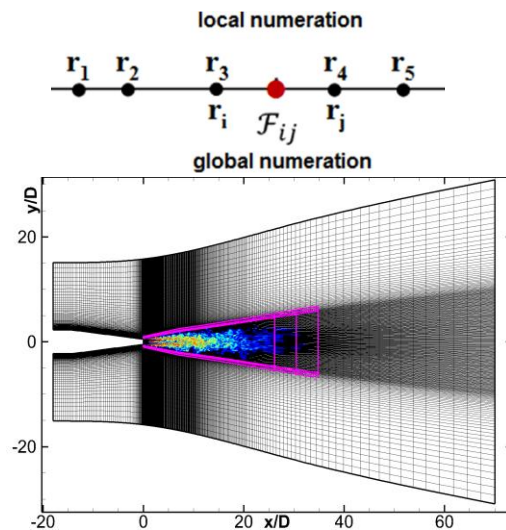
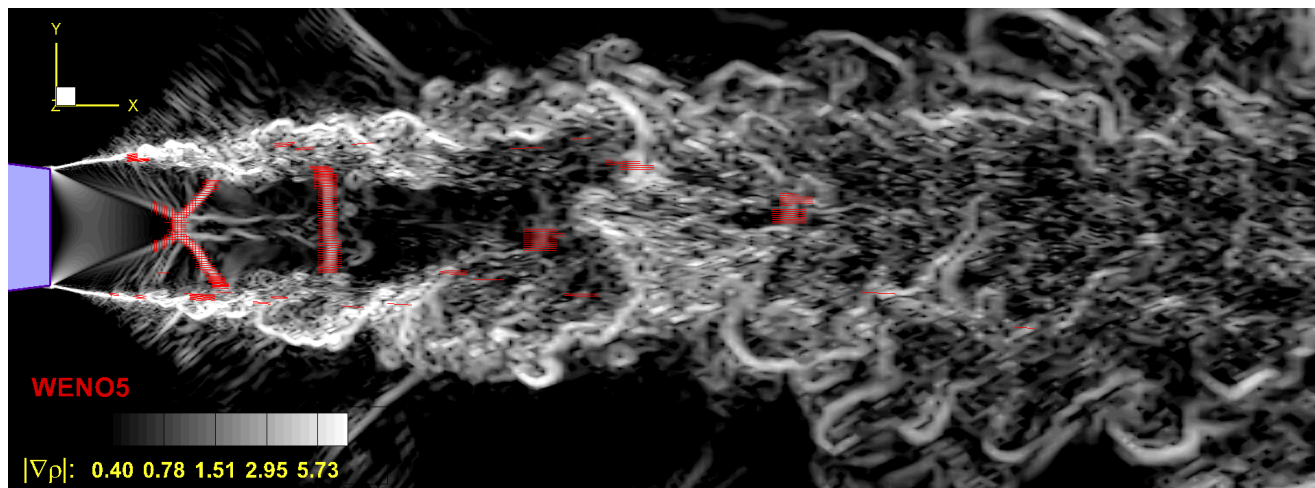
Оператор  $R$  трехкомпонентной реконструкции  $\Psi_{ij}^{R/L} = R_{ij}^{R/L}(\{\Psi\})$

$$R_{ij}^{HYBRID, L}(\{\Psi\}) = \sigma^3 R_{ij}^{WENO, L}(\{\Psi\}) + (\sigma - \sigma^3) R_{ij}^L(\{\Psi\}) + (1 - \sigma) \frac{R_{ij}^L(\{\Psi\}) + R_{ij}^R(\{\Psi\})}{2}$$

$$0 \leq \sigma \leq 1$$

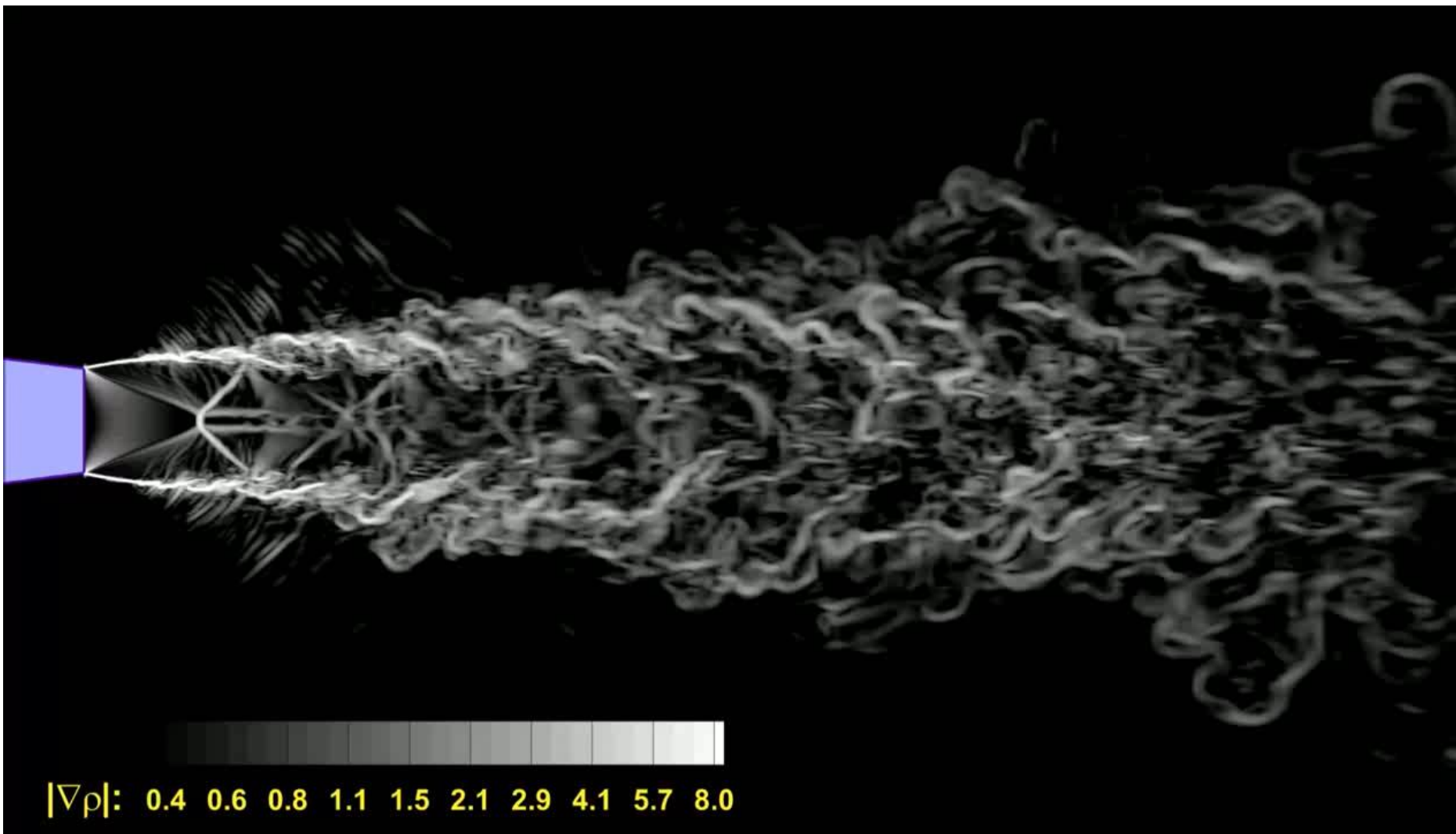
$$\sigma = 1 \quad \text{if } \max_{1 \leq i \leq 4} \left( \frac{|p_{i+1} - p_i|}{\min_{1 \leq i \leq 4} \{p_i, p_{i+1}\}} \right) \geq 0.3 \quad \sigma = \sigma_{2comp} \quad \text{if } \max_{1 \leq i \leq 4} \left( \frac{|p_{i+1} - p_i|}{\min_{1 \leq i \leq 4} \{p_i, p_{i+1}\}} \right) < 0.3$$

Alexey P. Duben and Tatiana K. Kozubskaya “Jet Noise Simulation Using Quasi-1D Schemes on Unstructured Meshes”, AIAA paper 2017-3856 DOI:10.2514/6.2017-3856 , (2017).

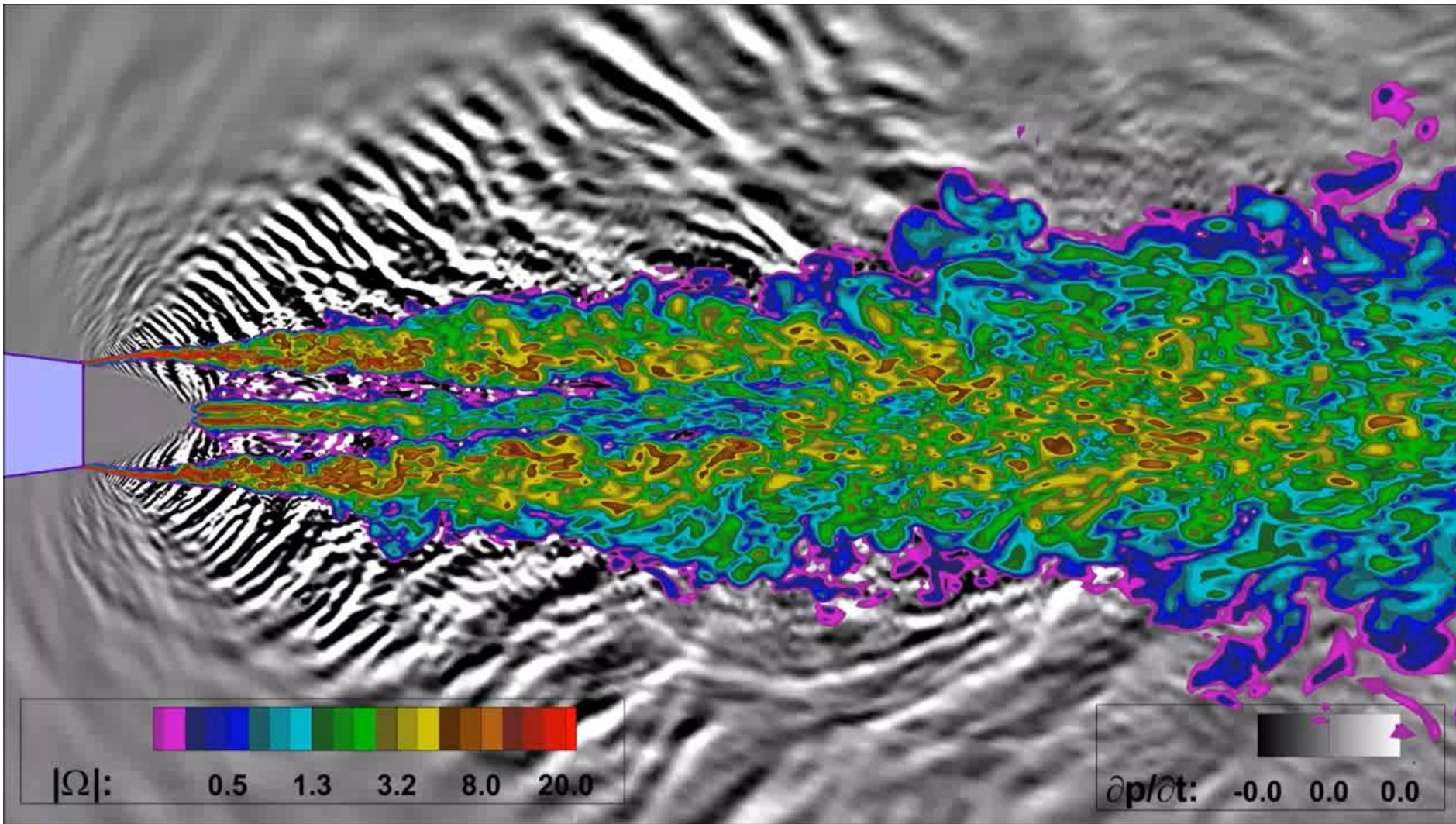


Сетка 5.5M узлов.

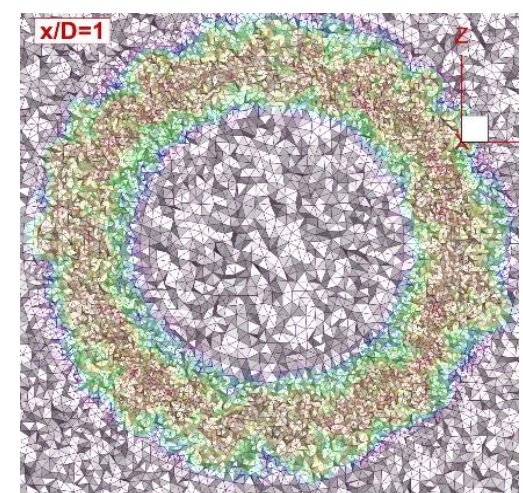
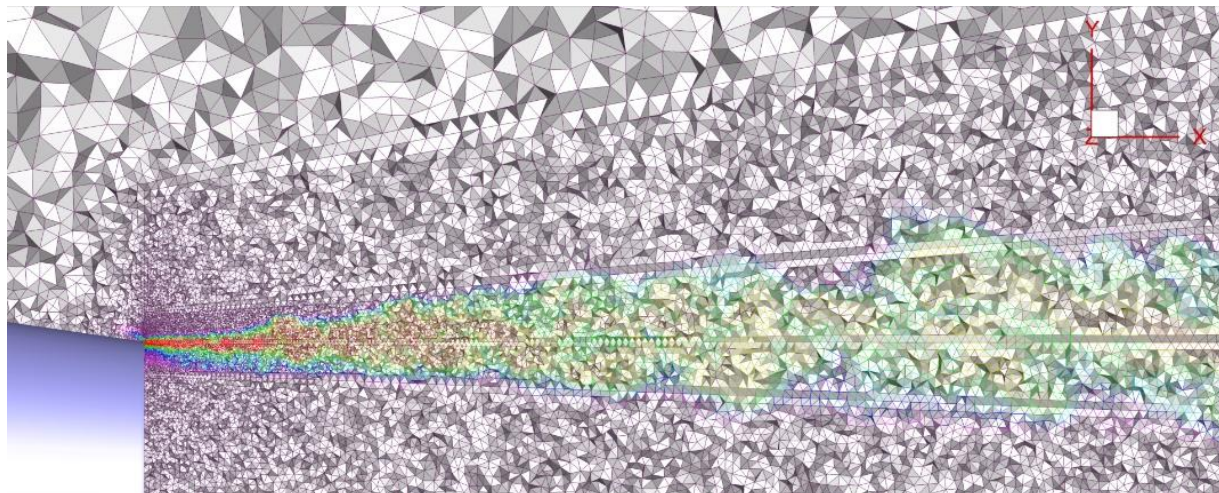
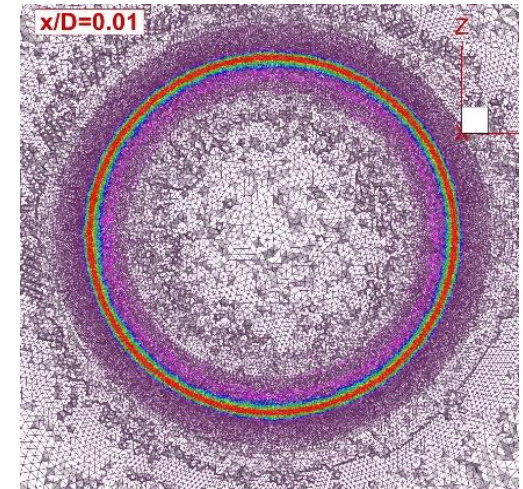
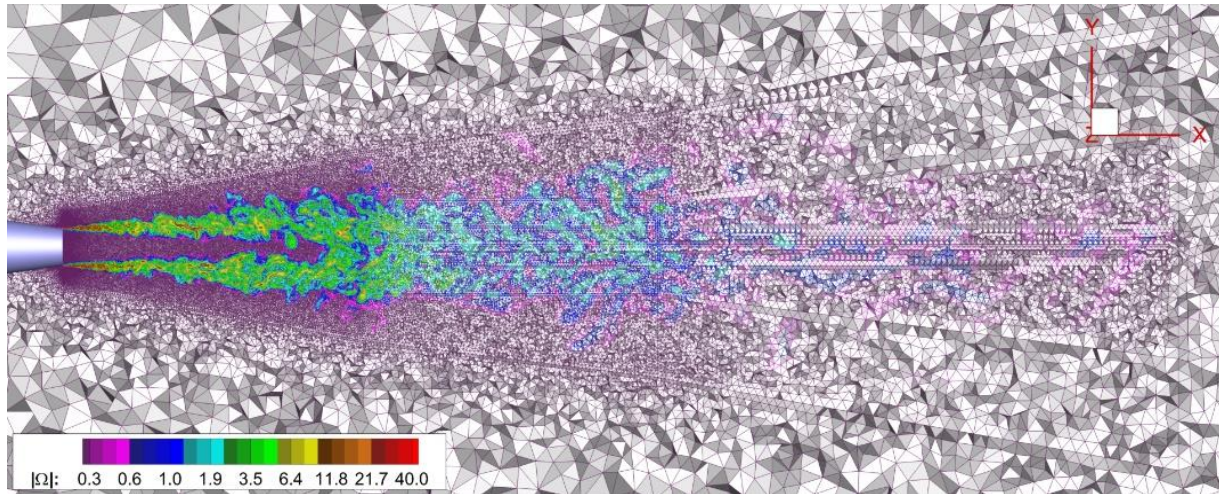
$M=1.54$ ,  $Re=1.3E6$ ,  $NPR=3.86$ ,  $NTR=2.97$ ,  $M_a=2.18$ ,  $U_{jet}=748.4$  m/s,



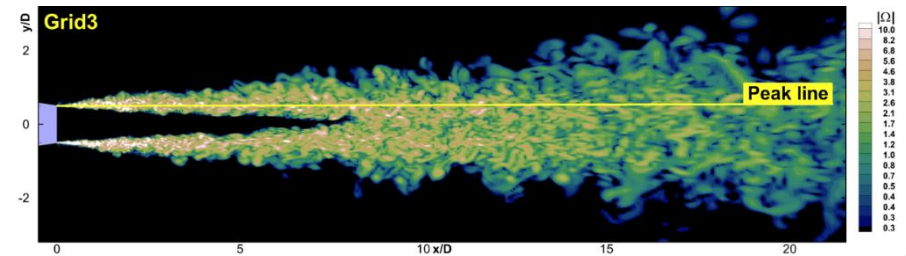
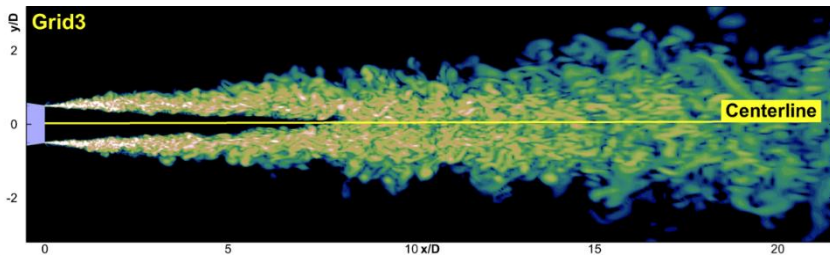
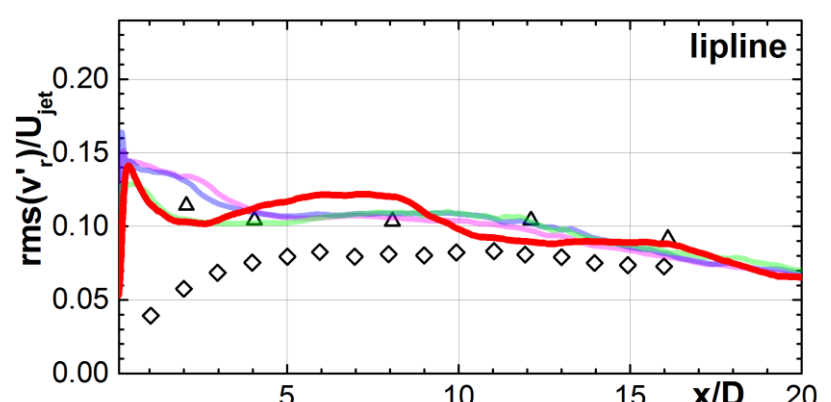
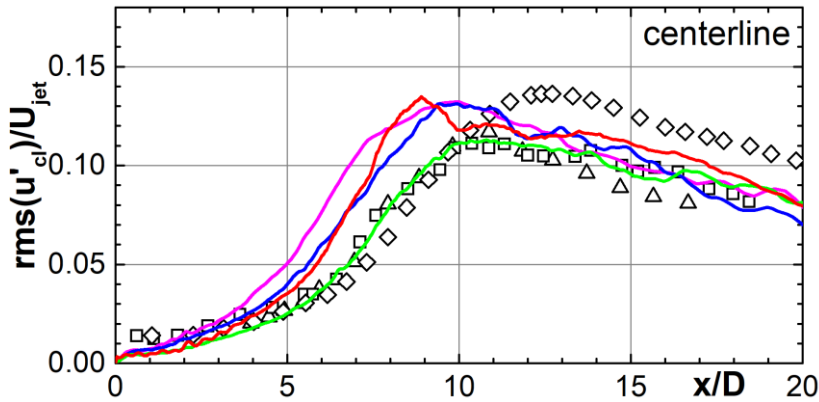
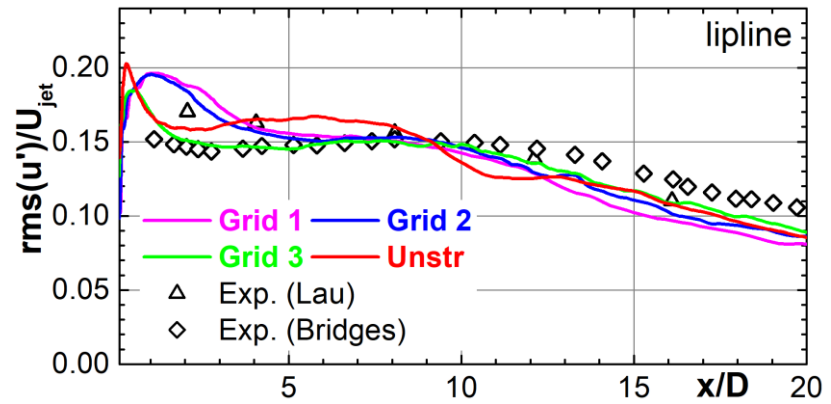
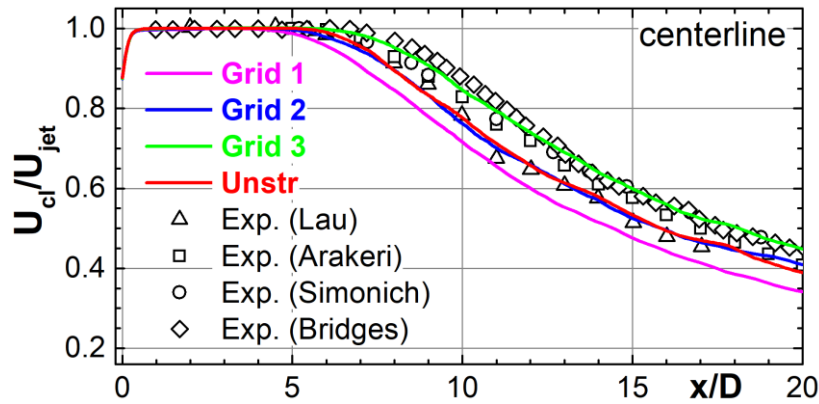
# Сверхзвуковая струя



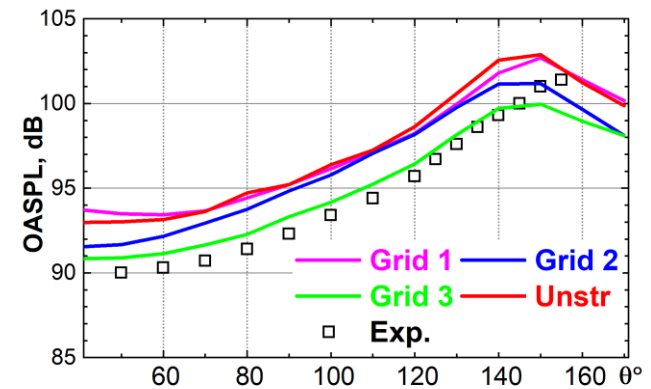
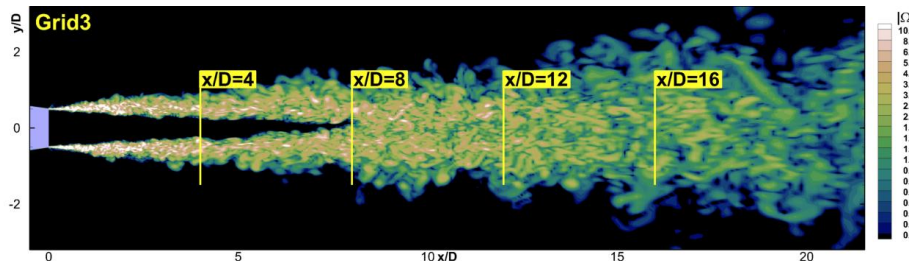
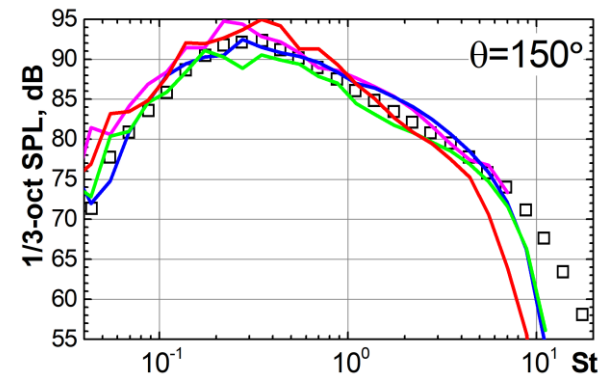
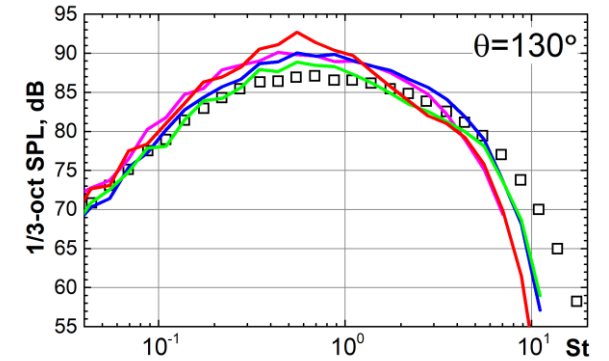
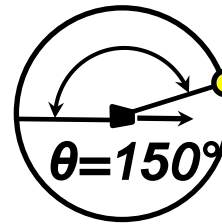
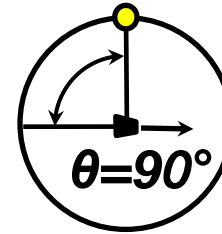
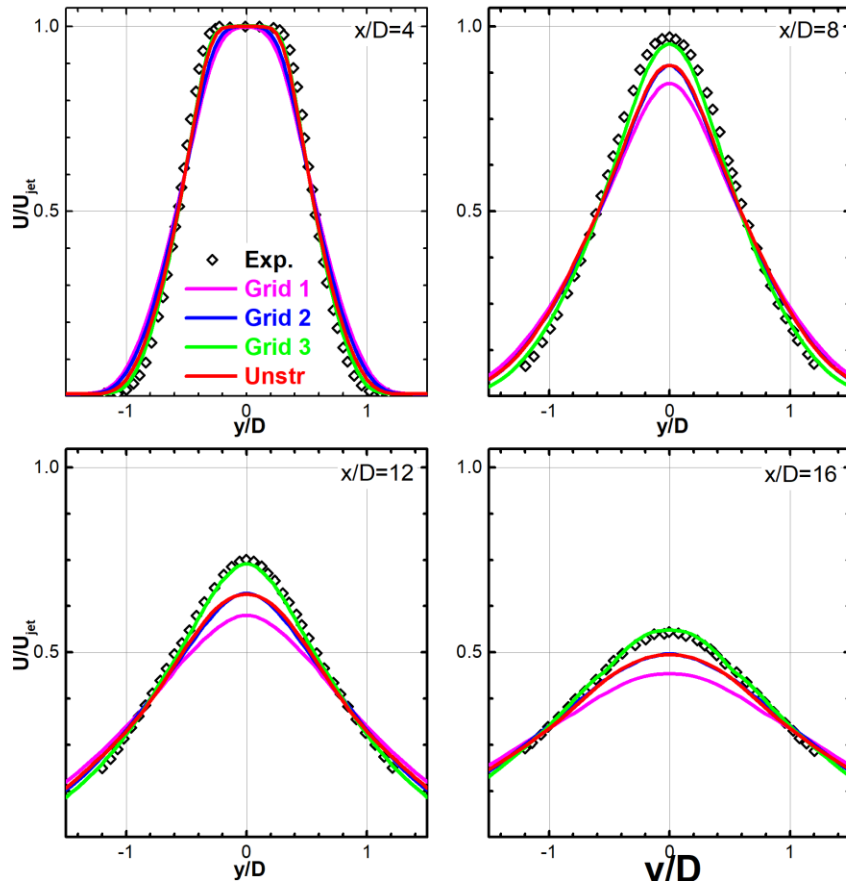
## Изотропная тетраэдральная сетка 6.1М узлов, 36.8М тетраэдров



# Дозвуковая струя: продольные профили

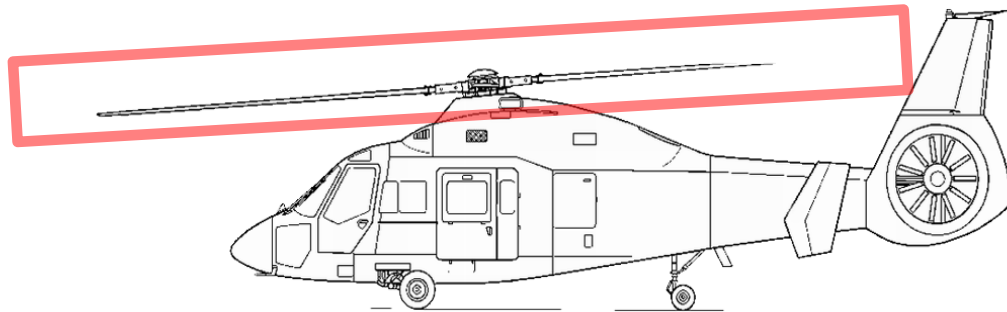


# Дозвуковая струя: поперечные профили, спектры

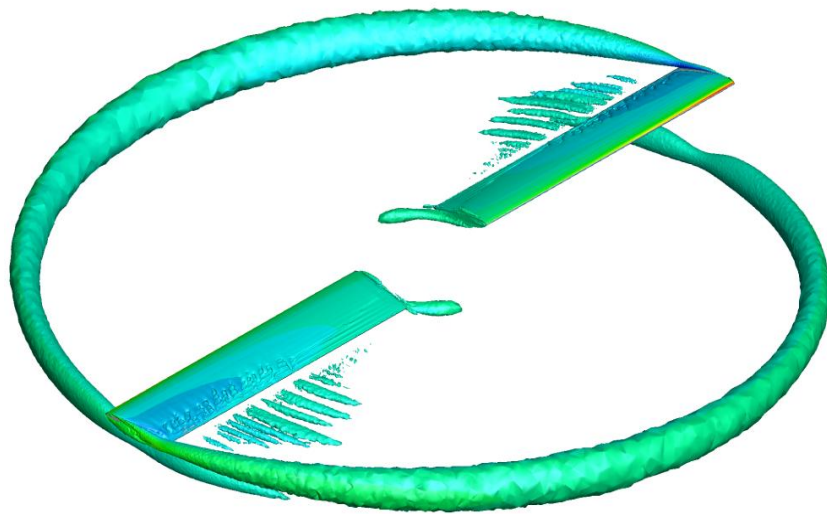


В настоящий момент ведется расчет на улучшенной неструктурированной сетке

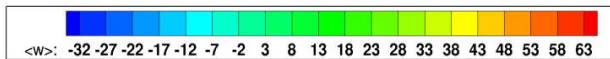
# Расчет несущего винта



Модельный винт: Caradonna-Tang



|  |            |
|--|------------|
| Число лопастей $N$                               | 2          |
| Радиус винта $R$                                 | 1.143 м    |
| Хорда лопасти $b$                                | 0.1905 м   |
| Профиль лопасти                                  | NACA 0012  |
| Угол установки лопасти                           | $8^\circ$  |
| Частота вращения винта                           | 650 об/мин |
| Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$ | 77.8 м/с   |

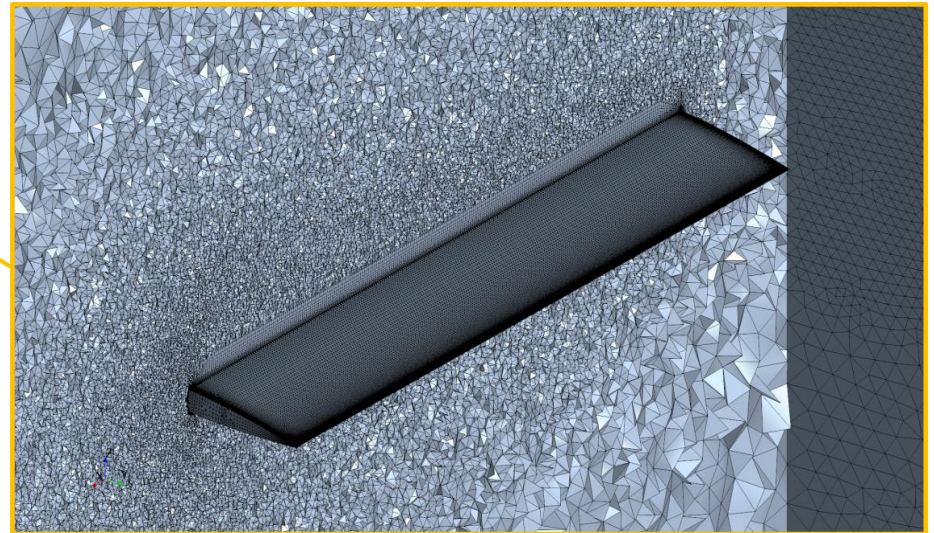
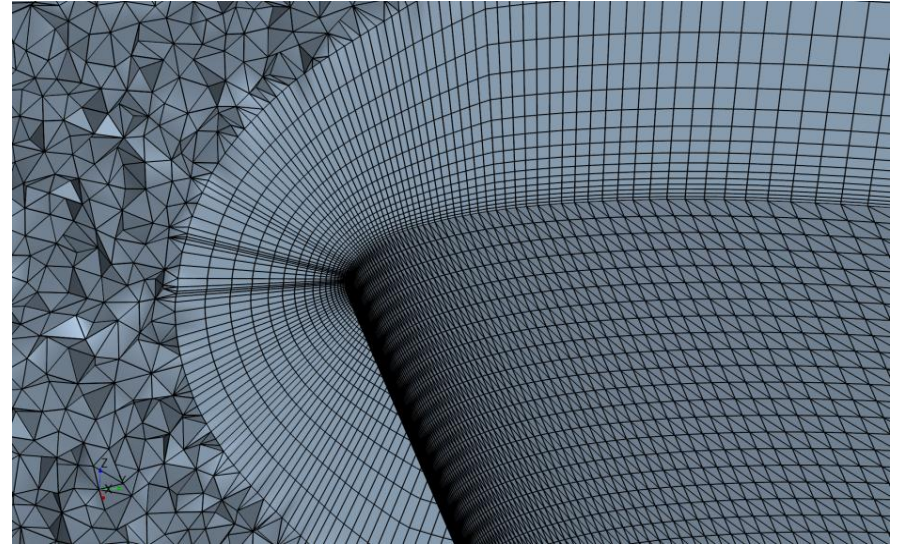
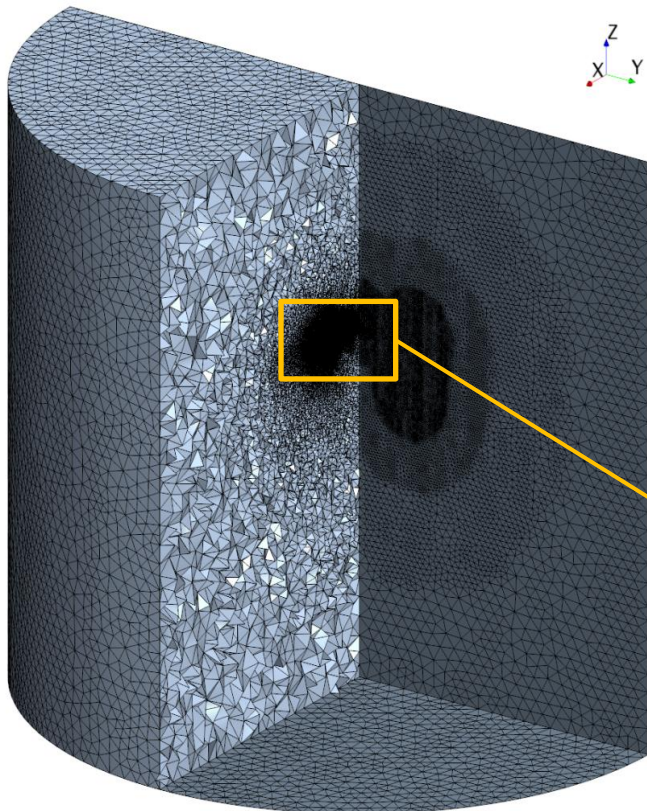


$$\rho_0 = 1.2041 \text{ кг/м}^3, \mu_0 = 1.827 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 V_{\text{лоп}} b}{\mu_0} = 6.28 \times 10^5$$

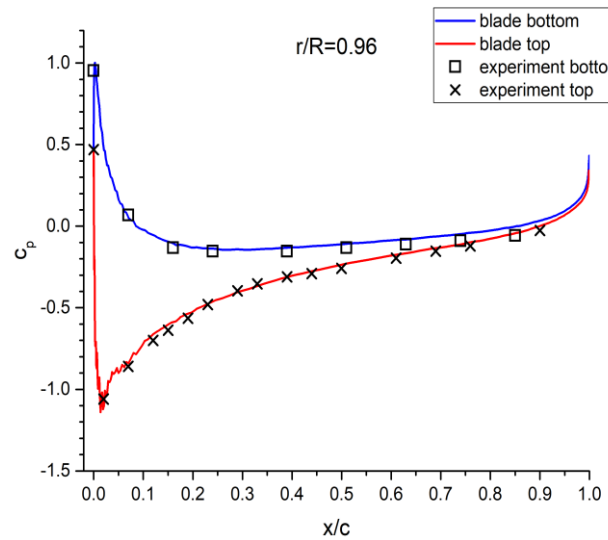
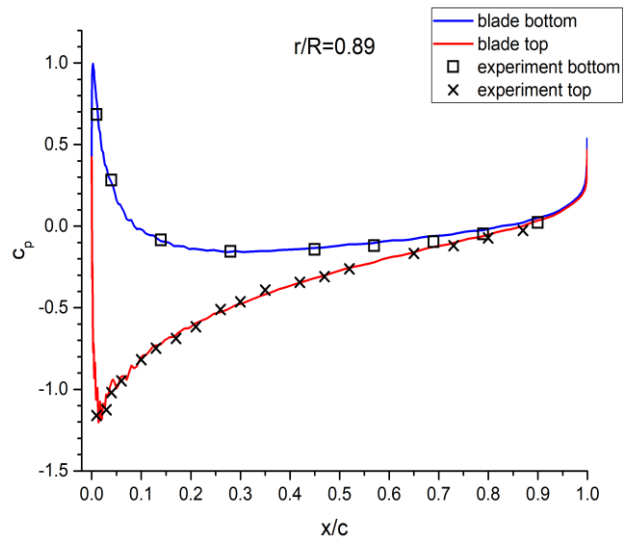
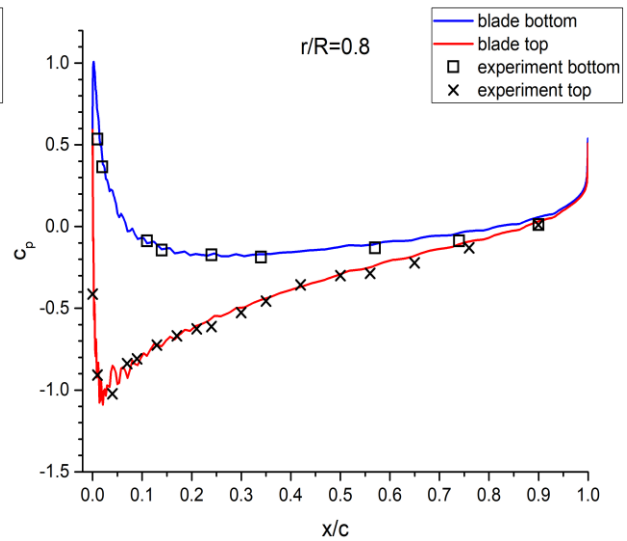
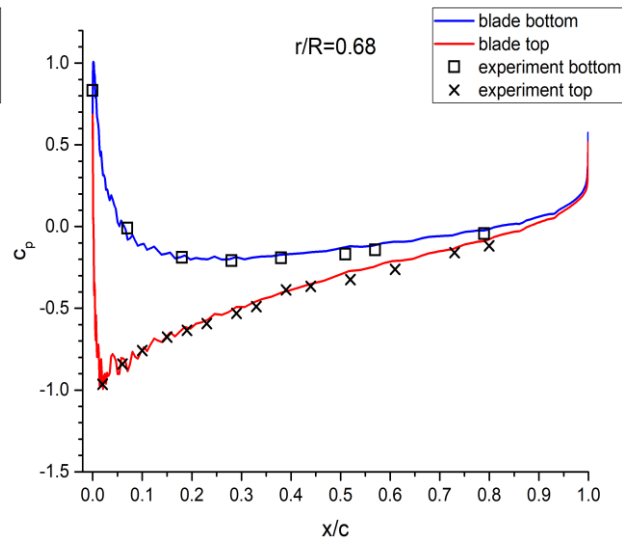
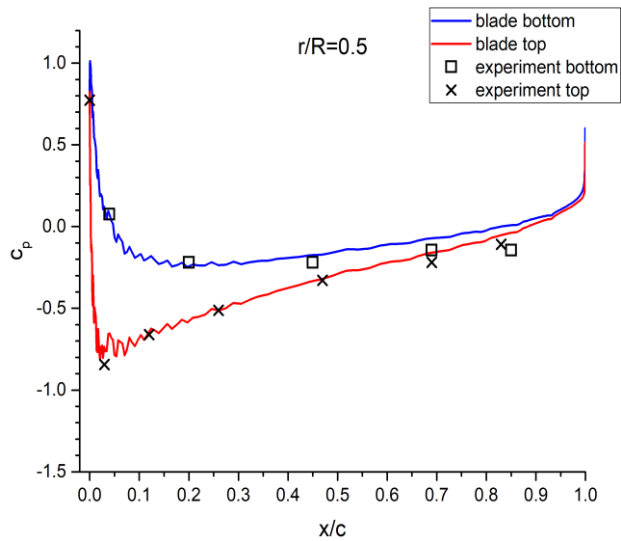
## Расчетная сетка

Сетка: 7 039 966 узлов, 37 526 305 элементов  
гибридная (треугольные призмы + тетраэдры)





# Распределение давления на поверхности



## Постановка задачи



Экспериментальный стенд (ОАО «Камов»)

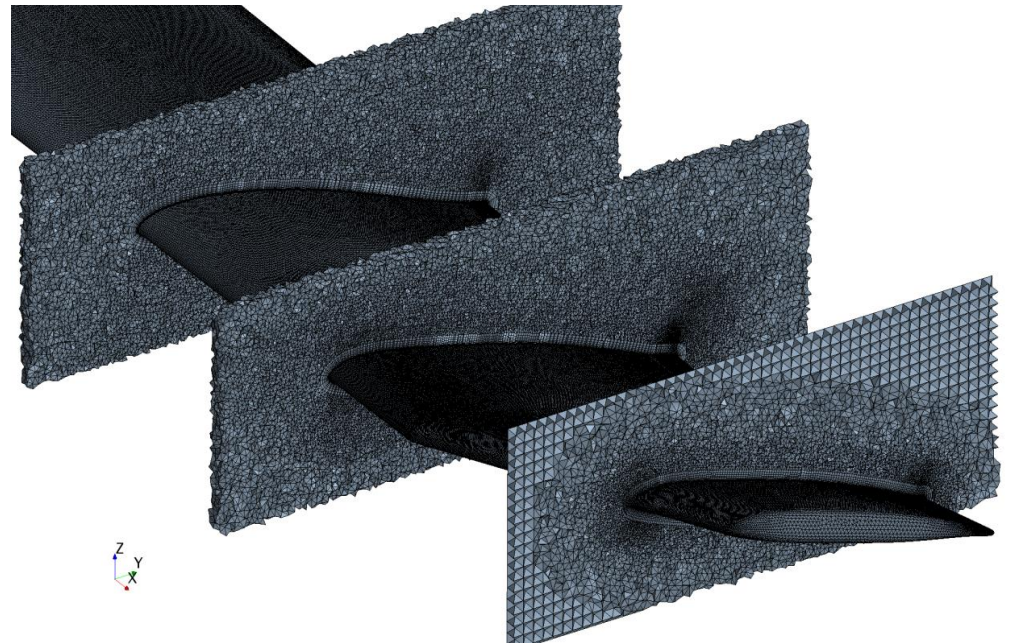
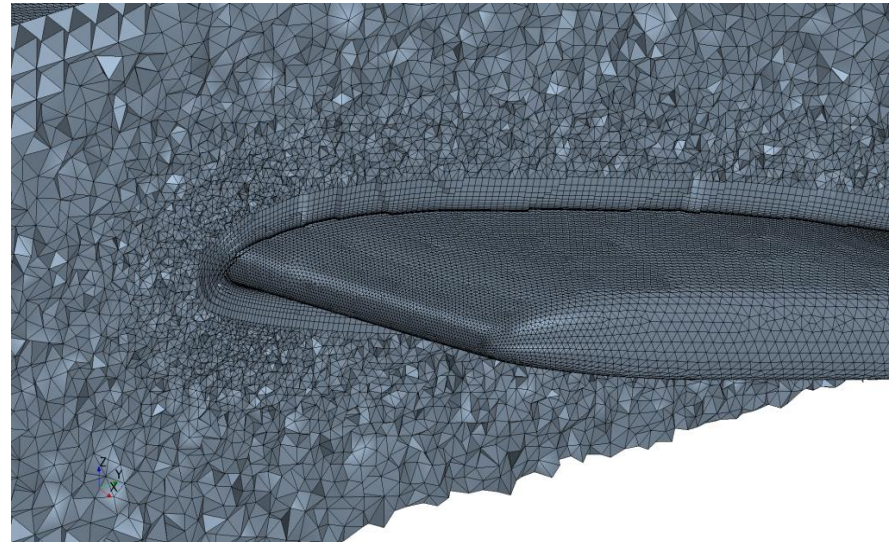
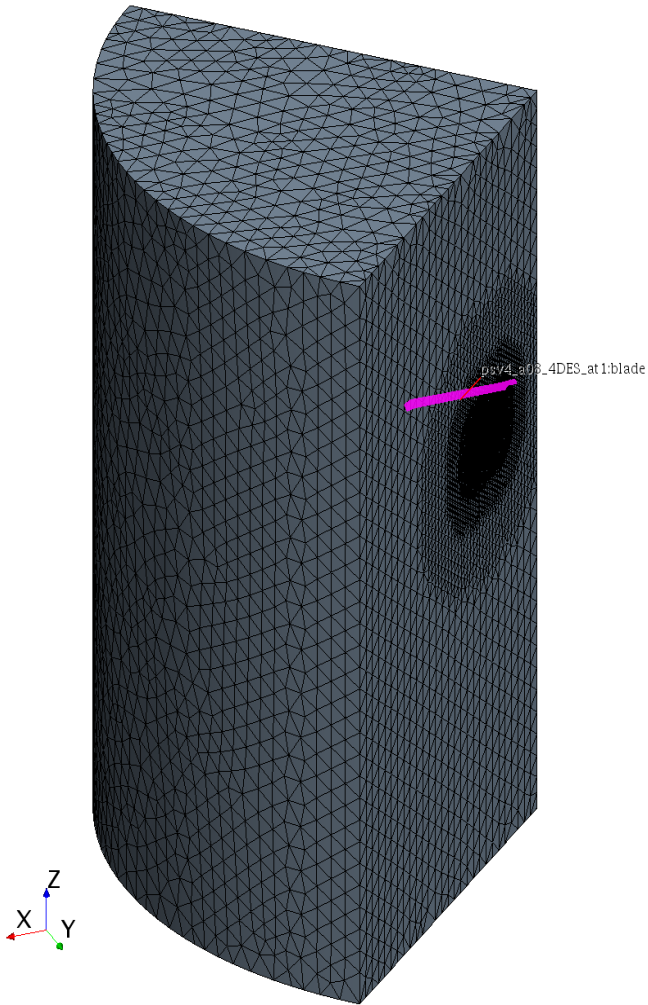
|  |   |
|--|---|
| Число лопастей $N$                               | 4   |
| Радиус винта $R$                                 | 1.952 м   |
| Хорда лопасти $b$                                | 0.18 м  |
| Профили лопасти                                  | 5 несимметричных профилей + законцовка  |
| Крутка   | лопасть ( $\bar{r} = 0.3 \dots 0.94$ ) – линейная<br>законцовка ( $\bar{r} = 0.94 \dots 1.0$ ) – линейная |
| Угол установки лопасти                           | $8^\circ$   |
| Частота вращения винта                           | 584.5 об/мин  |
| Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$ | 119.5 м/с   |

$$\rho_0 = 1.193 \text{ кг/м}^3, \mu_0 = 1.822027 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$$

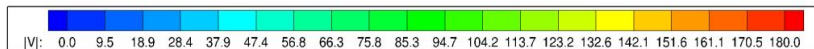
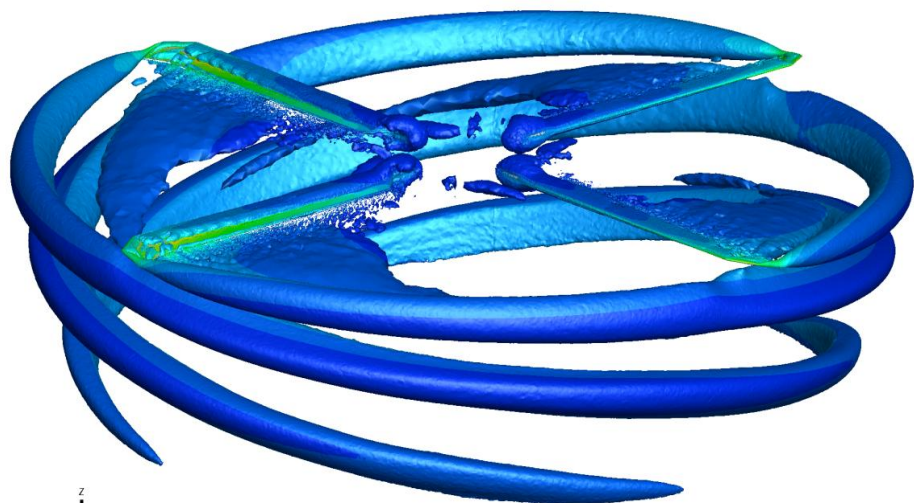
$$\text{Re} = \frac{\rho_0 V_{\text{лоп}} b}{\mu_0} \approx 1.4 \times 10^6$$

## Расчетная сетка

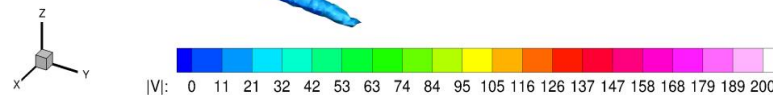
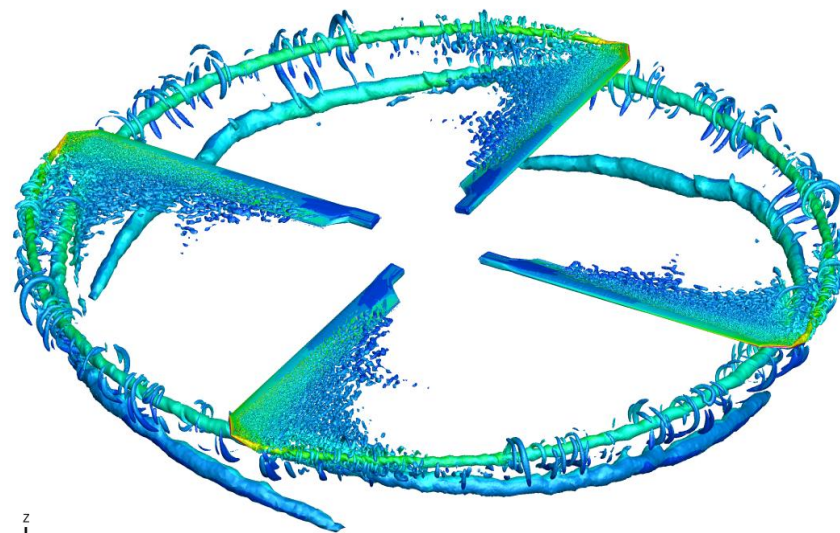
Сетка (сектор с одной лопастью):  
гибридная (треугольные призмы + тетраэдры)  
19 114 831 узлов, 98 998 161 элементов



# Концевой вихрь (изоповерхность Q-критерия)

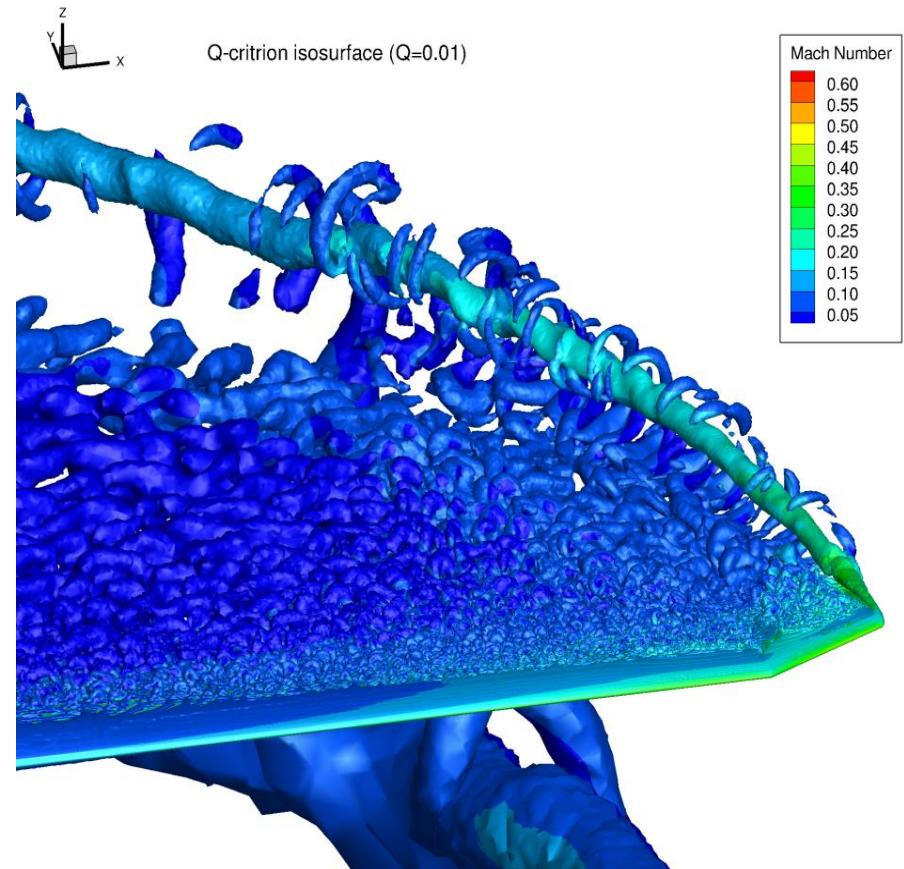
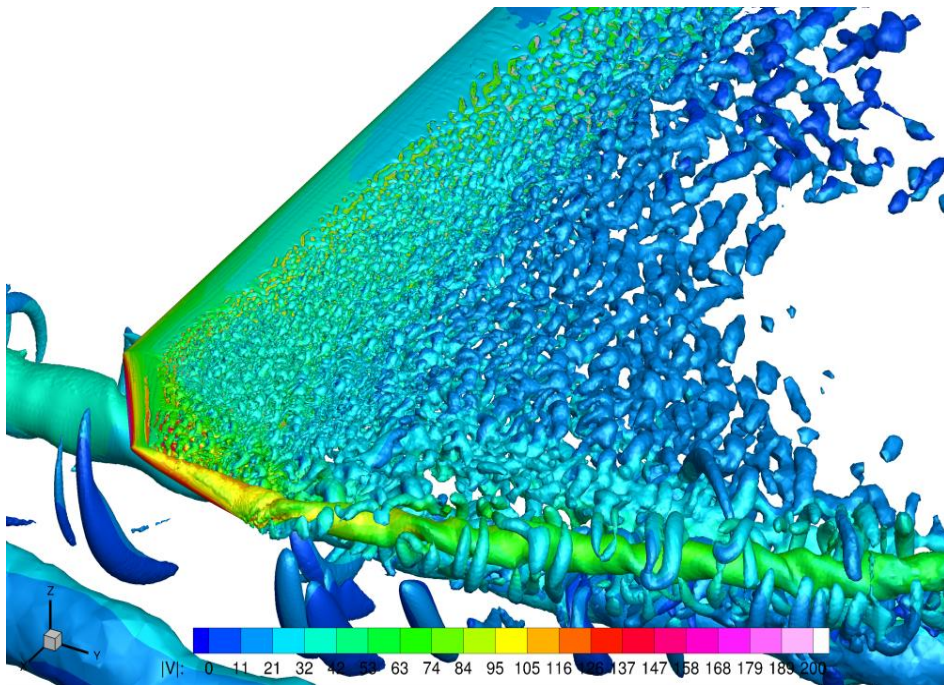


NOISEtte RANS

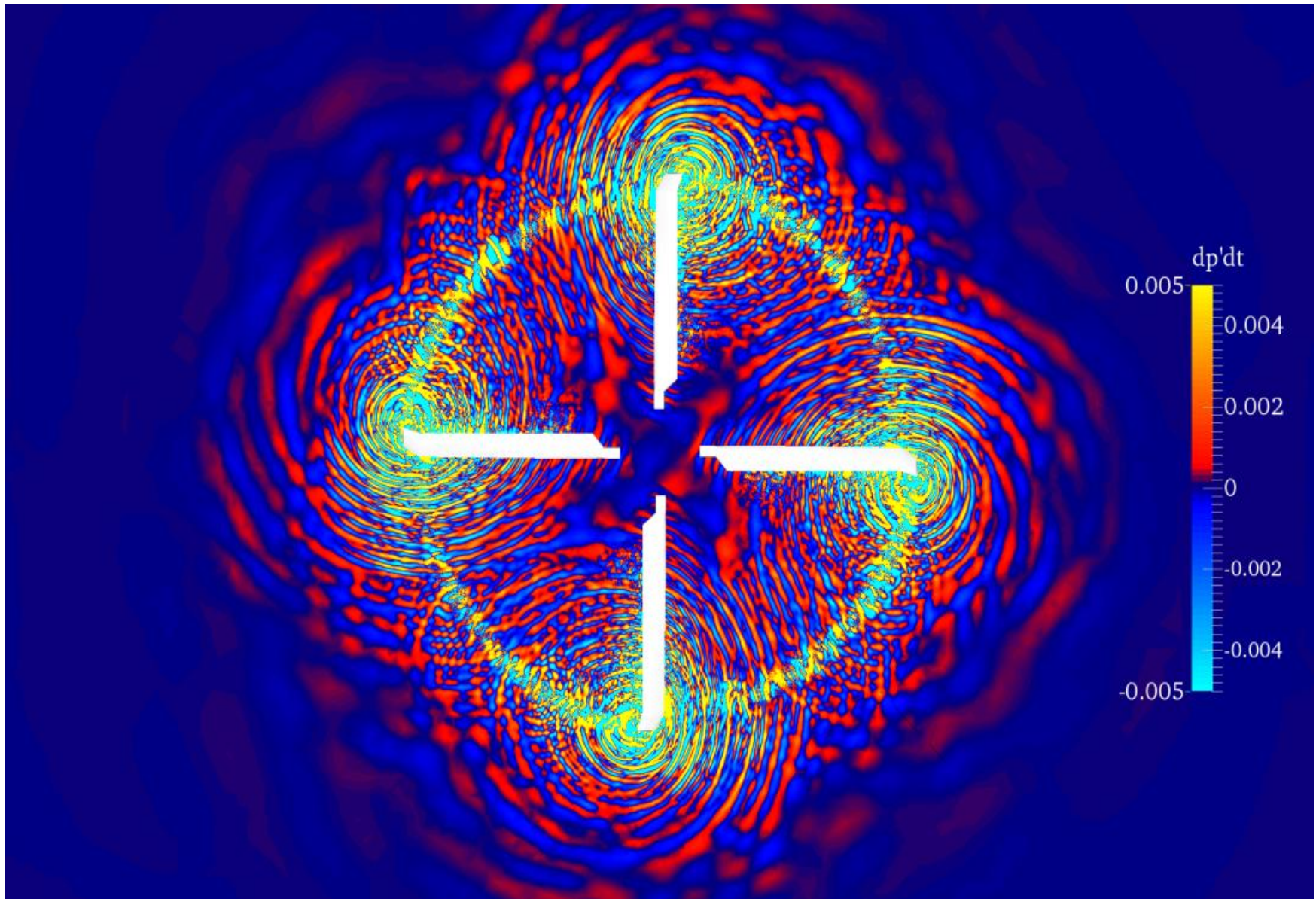


NOISEtte DES SA

# Концевой вихрь (изоповерхность Q-критерия)



# Мгновенное поле производной по времени пульсаций давления



## Интегральные аэродинамические характеристики

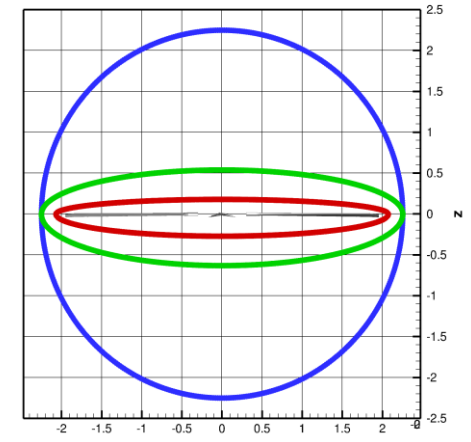
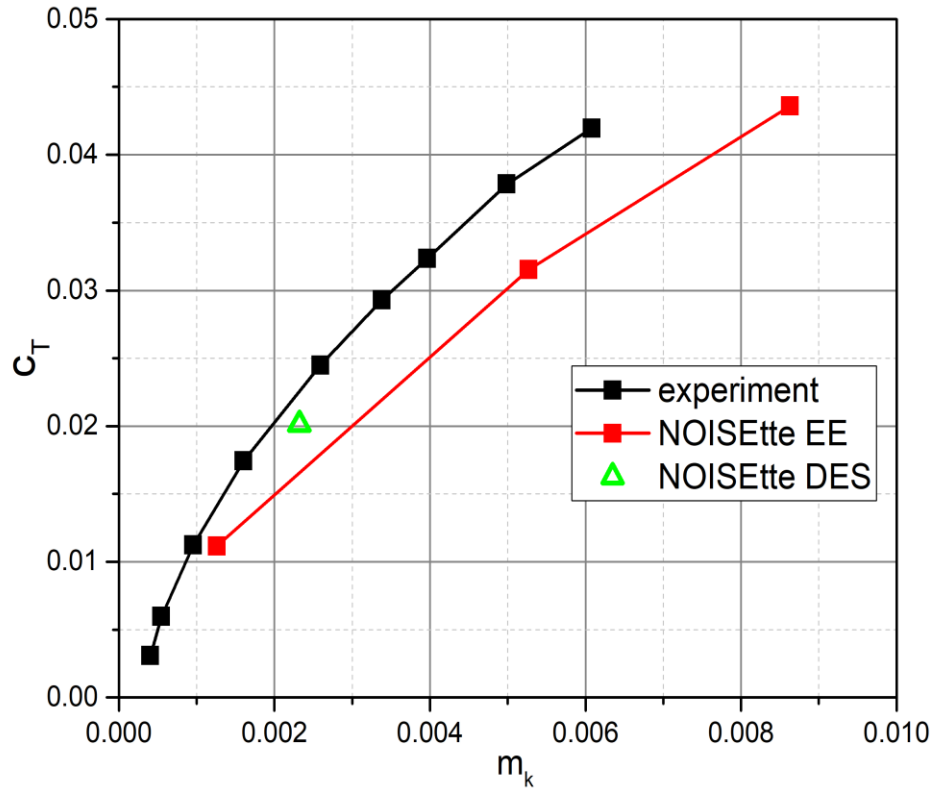
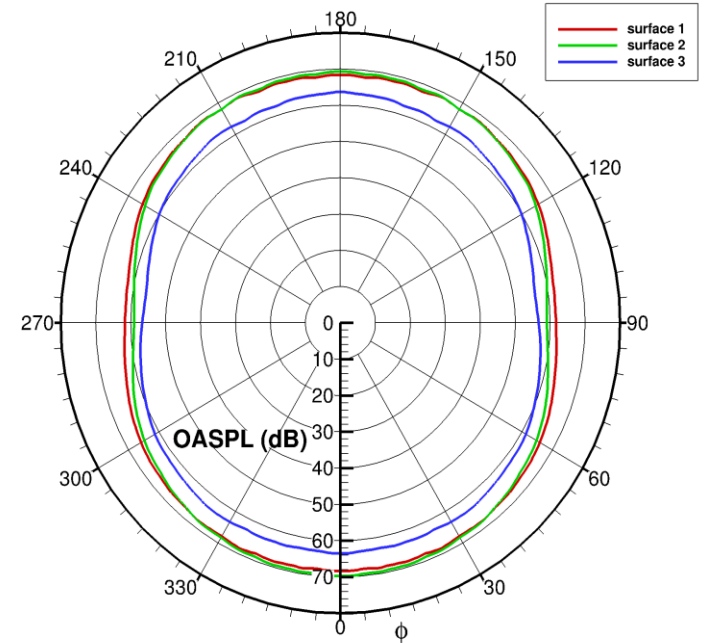
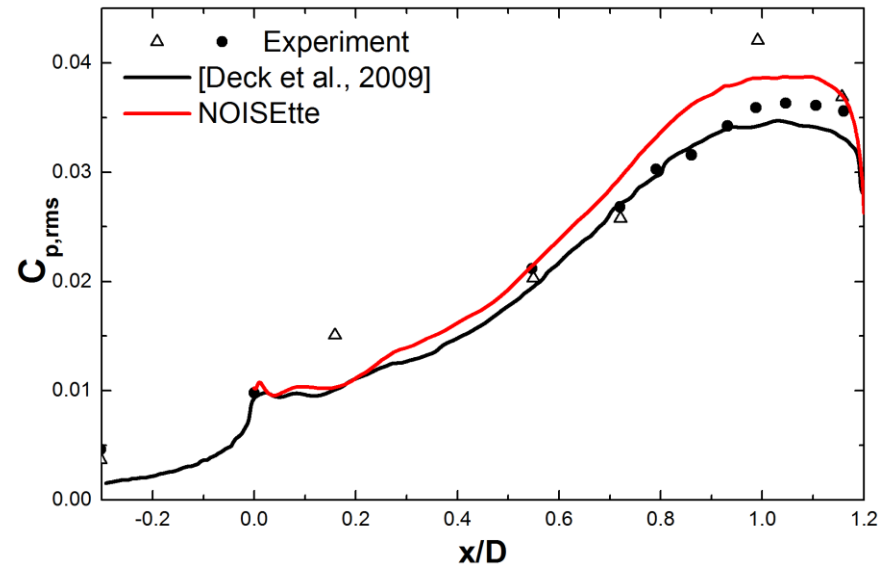
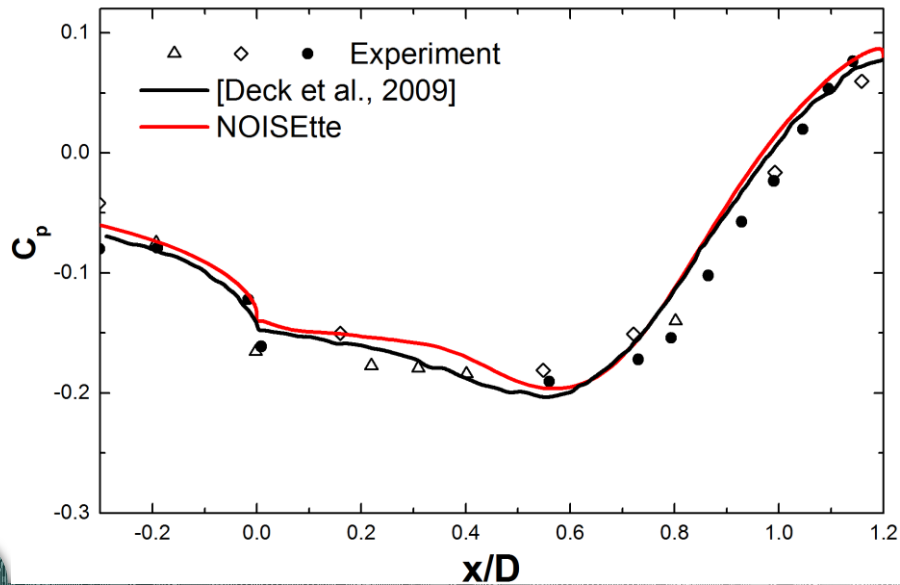
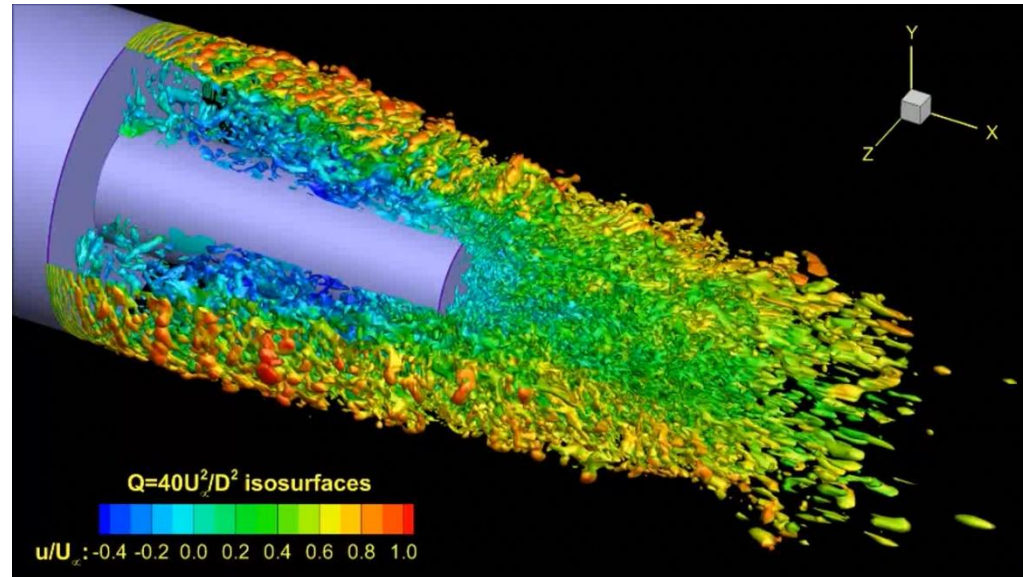
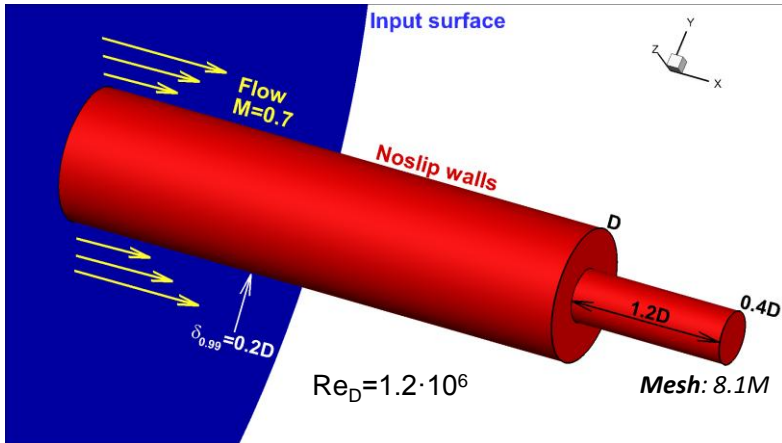


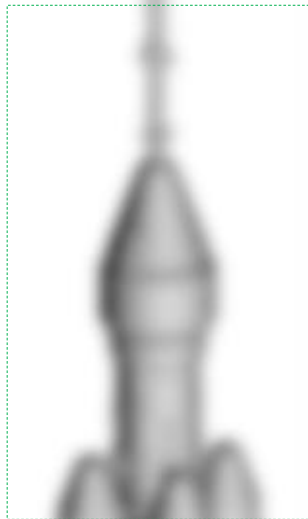
Диаграмма направленности  
общего уровня звукового давления



# Моделирование тел с изломами образующей







- ✓ **2D RANS** в осесимметричной постановке  
SA RANS, SST RANS
- ⌚ **3D RANS сектора** с учетом сопел и ступеней  
подготовка граничных условий для LES расчета  
в области интереса
- **3D LES** области интереса  
SST IDDES

## Основные публикации за 2017

Bakhvalov P., Kozubskaya T. EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes // *Computers and Fluids*. 2017. Vol. 157, p. 312-324. DOI.org/10.1016/j.compfluid.2017.09.004

Bakhvalov Pavel, Bobkov Vladimir, Kozubskaya Tatiana. Technology to Predict Acoustic Far-Field Disturbances in the Case of Calculations in a Rotating Reference Frame // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, Vol. 9, No. 6, pp. 717–727. DOI: 10.1134/S2070048217060035

Bakhvalov Pavel, Kozubskaya Tatiana. Modification of Flux Correction method for accuracy improvement on unsteady problems // *Journal of Computational Physics*, Volume 338, Pages 199–216 DOI:10.1016/j.jcp.2017.02.053

Bakhvalov Pavel, Kozubskaya Tatiana. Construction of Edge-Based 1-Exact Schemes for Soling the Euler Equations on Hybrid Unstructured Meshes // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2017, Vol. 57, No. 4, pp. 680–697. DOI: 10.1134/S0965542517040030

Duben Alexey, Kozubskaya Tatiana. Jet Noise Simulation Using Ouasi-1D Schemes on Unstructured Meshes // AIAA AVIATION Forum 5-9 June 2017, Denver, Colorado 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. DOI:10.2514/6.2017-3856

Abalakin Ilya, Bobkov Vladimir, Kozubskaya Tatiana. Implementation of the Low Mach Number Method for Calculating Flows in the NOISEtte Software Package // *Mathematical Models And Computer Simulations* 2017, Vol. 9, No. 6, pp. 689-697. DOI: 10.1134/S2070048217060023

Дубень А.П., Жданова Н.С., Козубская Т.К. Численное исследование влияния дефлектора на аэродинамические и акустические характеристики турбулентного течения в каверне // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2017, № 4, С. 1–12. DOI:10.7868/S0568528117040107

Богданов П.Б., Горобец А.В., Суков С.А. Переносимое решение для моделирования сжимаемых течений на всех существующих гибридных суперкомпьютерах. // *Математическое моделирование* 2017, Т. 29. № 8, С. 3–16

F.X.Trias, A.Gorobets, M.H.Silvis, R.W.C.P.Verstappen, and A.Oliva. "A new subgrid characteristic length for turbulence simulations on anisotropic grids". *Physics of Fluids* 29, 115109 (2017); DOI: 10.1063/1.5012546

Кадры...



No headhunt

Присутствующие студенты, аспиранты, сотрудники вузов!  
Распространяйте слухи, что у нас можно работать, делать диссер, диплом, ...  
а также вести совместную научную работу, решать свои задачи нашим кодом.